Л. А. ЮТКИН

Электрогидравлический эффект

И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Л. А. ЮТКИН

Электро-гидравлический эффект

И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЛЕНИНГРАД
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1986

ББК 34.57
Ю92
УДК 621.7.044.4

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

член-корр. АН СССР, акад. АН УССР, д-р техн. наук проф. **К. К. Хренов** и д-р техн. наук. проф. **И. С. Лискер**

Научный редактор канд. физ.-мат. наук В. И. Иванов

Л. А. Юткин

Ю92 Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986.— 253 с., ил.

В пер.: 1 р. 20 к.

В книге крупного изобретателя, ученого, лауреата Государственной премии УССР, основателя нового направления в науке и технике — электрогидравлики в доступной форме изложены физические основы электрогидравлического эффекта. Рассмотрены схемы и оборудование электрогидравлических установок. Приведены методы управления разрядом и повышения КПД эффекта, принципиально новые конструкции установок и устройств для обработки машиностроительных изделий. Описаны электрогидравлические устройства, используемые для горного, химического, сельскохозяйственного и транспортного машиностроения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией электрогидравлического оборудования.

Ю $\frac{\textbf{2704050000-922}}{\textbf{038 (01)-86}}$ **КБ-20-9-1985**

ББК 34.57
6П4.4

© Издательство «Машиностроение», 1986 г.

Предисловие

При создании внутри объема жидкости специально сформированного импульсного высоковольтного электрического разряда в зоне последнего развиваются сверхвысокие давления, которые можно широко использовать в практических целях,— так, впервые в 1950 г. Л. А. Юткиным был сформулирован предложенный им новый способ трансформации электрической энергии в механическую, названный автором электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ).

Электрогидравлический эффект с первых дней его открытия был и остается постоянным источником рождения множества прогрессивных технологических процессов, которые сейчас уже широко применяются во всем мире. Этим обусловливаются его непреходящее значение и все возрастающий интерес, проявляемый к нему в самых различных отраслях науки, техники и народного хозяйства.

Последние 30 лет жизни Л. А. Юткин активно и плодотворно работал в области электрогидравлики. За этот период им были разработаны теоретические основы явления, определены методы управления процессом, значительно расширяющие возможности и обеспечивающие высокий КПД электрогидравлической обработки материалов, было предложено более 200 способов и устройств практического применения ЭГЭ, получено 140 авторских свидетельств на изобретения, издано 50 публикаций по электрогидравлике. Под его руководством были разработаны принципиальные конструкции промышленных установок различного назначения, проведены поисковые работы, подготовлены к внедрению и частично внедрены устройства и технологические процессы, позволяющие эффективно использовать электрогидравлический эффект во многих областях народного хозяйства.

Президиум Академии наук УССР в июне 1982 г., определяя значение научной деятельности Л. А. Юткина, отметил, что изобретение им способа получения высоких и сверхвысоких давлений (а. с. 105011, СССР) легло в основу нового промышленного способа трансформации электрической энергии в механическую, нового электрогидравлического способа обработки материалов и практического использования ЭГЭ (а. с. 121053,

СССР). Л. А. Юткин являлся ведущим специалистом в разработке теории ЭГЭ. Посмертно Л. А. Юткин был удостоен звания лауреата Государственной премии УССР за 1981 год.

В книге отражены основные результаты научной, изобретательской и инженерной деятельности Л. А. Юткина. Большинство материалов публикуется впервые. Книга подготовлена к изданию основным соавтором и правопреемником Л. И. Гольцовой.

Ограниченный объем книги не позволил достаточно полно изложить все основные разработки автора.

Сегодня, по данным ГКНТ СССР, внедрение различных электрогидравлических машин и технологических процессов приносит нашей стране ежегодно десятки миллионов рублей экономии. Однако широкое практическое освоение электрогидравлики еще только начинается. Опубликование книги, несомненно, будет способствовать ускорению внедрения электрогидравлического эффекта во все отрасли народного хозяйства.

Все отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, ЛО изд-ва «Машиностроение».

Введение

Впервые заинтересовавшись искровыми электрическими разрядами в воде в 1933 году, автор в дальнейшем целиком посвятил себя решению проблемы получения с помощью электрического разряда эффективного гидравлического удара. В конце 1930-х годов автором был в основном сформулирован и кардинальный для всей электрогидравлики принцип получения так называемых сверхдлинных разрядов. В 1948 г. появилась возможность основательно заняться изучением проблемы, а это привело к патентованию первого и основополагающего изобретения в области электрогидравлики — «Способа получения высоких и сверхвысоких давлений», т. е. способа получения электрогидравлического эффекта [14].

Но электрогидравлика не родилась из ничего и имеет своих предшественников. Опыты с искровыми разрядами в жидкости проводились учеными еще в XVIII веке. Так, в 1766 г. американский естествоиспытатель Т. Лейн в своем письме, адресованном Б. Франклину, содержавшем описание устройства и работы изобретенного им электрометра, в качестве доказательства того, что его прибор действительно измеряет количество, а не какие-то особые качества электричества, писал, что им ставились разнообразные опыты с разрядами, содержащими различные количества электричества, причем разряды эти осуществлялись им не только в воздухе, но и в воде и других жидкостях [11].

Из описания опытов и работы прибора, изобретенного Лейном, можно понять, что в его опытах действительно возникали искровые разряды в воде длиной в несколько миллиметров с достаточно крутым фронтом и высоким поэтому механическим КПД. Опыты Лейна поражают своей простотой и свежестью мысли. Однако подлинный смысл и огромное значение наблюдаемых в опытах явлений остались совершенно незамеченными и непонятыми ни самим Т. Лейном, ни Б. Франклином, ни Д. Пристли, повторившим опыты Лейна в 1769 г. [12], ни многими другими учеными, знавшими об их работах. Не случайно поэтому об опытах Т. Лейна и Д. Пристли впервые вспомнили лишь 200 лет спустя — после опубликования наших первых работ, когда вся электрогидравлика как наука практически уже сформировалась.

В литературе по электрогидравлике иногда упоминают и другие работы, заслуживающие самой высокой оценки, но не имеющие прямого отношения к электрогидравлике. Одной из таких работ была статья Г. И. Покровского и В. А. Ямпольского «Электрогидродинамическая аналогия кумуляций» [2]. Однако уже само название ее говорит о полном несходстве с содержанием и смыслом работ автора. В книге Г. И. Покровского, изданной в 1962 г. [1], подчеркивается наш приоритет на открытие электрогидравлического эффекта. Упоминалось также и изобретение И. В. Федорова «Способ и приспособление для дезинфекции и стерилизации с помощью токов высокой частоты» [13]. Однако в этой работе отсутствуют те основные отличительные признаки, которые лежат в основе осуществления электрогидравлического эффекта — укорочение фронта и длительности электрического импульса. В схеме И. В. Федорова нет формирующего искрового промежутка — обострителя импульса, который позволяет перейти к напряжениям, гораздо бо́льшим пробивных для рабочего промежутка, и поэтому устройство, изобретенное И. В. Федоровым, фактически является искровым источником звука и не может быть источником получения электрогидравлического эффекта.

Работы предшественников электрогидравлики завершились в 1948 г. опубликованием статьи Ф. Фрюнгеля «К механическому КПД искры в жидкостях» [10]. Не сделав ни одного практического вывода и определив найденный им механический КПД разряда в 1 %, Ф. Фрюнгель затем надолго отошел от изучения подобных разрядов, снова занявшись ими уже только после опубликования работ автора.

Причин, по которым многие исследователи прошли мимо огромных практических возможностей нового физического явления, очень много. В основе их общей неудачи, очевидно, лежит отсутствие изобретательского, практического взгляда на изучаемые явления, а также и отсутствие общественной потребности в использовании сверхвысоких гидравлических давлений.

Отдавая дань уважения исследованиям наших предшественников, нельзя не признать, что от Лейна и до Фрюнгеля науке было известно только явление электрического разряда в жидкости как таковое, без каких-либо указаний на то, что миллиметровый разряд в жидкости является прообразом нового промышленного способа трансформации электрической энергии в механическую и может быть широко использован в самых различных областях науки и техники.

Дальнейшие работы автора позволили расширить и углубить теоретические представления о природе электрогидравлического эффекта, определить ряд методов и приемов, обеспечивающих высокий КПД работающих на этом принципе машин и механизмов, предложить более двухсот способов и устройств применения электрогидравлического эффекта, многие из которых уже внедрены на практике.

По опубликованным данным, сотни установок для электрогидравлической обработки металлов самого различного назначения уже работают за рубежом, где наибольшее развитие получила электрогидравлическая штамповка. В СССР наиболее широко используются установки для электрогидравлической очистки литья. Десятки серийно выпускаемых на опытном заводе ПКБ электрогидравлики АН УССР (г. Николаев) и на заводе Амурлитмаш (г. Комсомольск-на-Амуре) электрогидравлических установок для очистки литья ежегодно вступают в строй действующих. Ряд таких установок поставляются на экспорт. Проданы лицензии на изготовление и поставку электрогидравлических установок в Швецию, Испанию, Венгрию, Японию. В различных отраслях промышленности СССР работает также более 140 электрогидравлических прессов, десятки электрогидравлических установок для развальцовки трубок теплообменных аппаратов, электрогидравлические дробилки различных модификаций, электрогидравлические установки для разрушения негабаритов и др.

По данным ГКНТ СССР, только за период с 1971 по 1975 гг. фактический экономический эффект от применения электрогидравлического эффекта в народном хозяйстве СССР составил 23 млн. руб. Внедрение различных электрогидравлических технологий и оборудования имеет самые широкие перспективы и в будущем.

Глава 1

Сущность и особенности электрогидравлического эффекта

1.1. Сущность электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) — новый промышленный способ преобразования электрической энергии в механическую, совершающийся без посредства промежуточных механических звеньев, с высоким КПД. Сущность этого способа состоит в том, что при осуществлении внутри объема жидкости, находящейся в открытом или закрытом сосуде, специально сформированного импульсного электрического (искрового, кистевого и других форм) разряда вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу и сопровождающиеся комплексом физических и химических явлений [7, 14].

В основе электрогидравлического эффекта лежит ранее неизвестное явление резкого увеличения гидравлического и гидродинамического эффектов и амплитуды ударного действия при осуществлении импульсного электрического разряда в ионопроводящей жидкости при условии максимального укорочения длительности импульса, максимально крутом фронте импульса и форме импульса, близкой к апериодической.

Для электрогидравлического эффекта характерен режим выделения энергии на активном сопротивлении контура, близком к критическому, т. е. когда $1/C < R^2/4L$, где C — емкость конденсатора, R и L — активное сопротивление и индуктивность контура. Отсюда следует, что основными факторами, определяющими возникновение электрогидравлического эффекта, являются амплитуда, крутизна фронта, форма и длительность электрического импульса тока. Длительность импульса тока измеряется в микросекундах, поэтому мгновенная мощность импульса тока может достигать сотен тысяч киловатт. Крутизна фронта импульса тока определяет скорость расширения канала разряда. При подаче напряжения на разрядные электроды в несколько десятков киловольт амплитуда тока в импульсе достигает десятков тысяч ампер. Все это обусловливает резкое и значительное возрастание давления в жидкости, вызывающее в свою очередь мощное механическое действие разряда.

Осуществление электрогидравлического эффекта связано с относительно медленным накоплением энергии в источнике питания и практически мгновенным ее выделением в жидкой среде. Основными действующими факторами электрогидравлического эффекта являются высокие и сверхвысокие импульсные гидравлические давления, приводящие к появлению ударных волн со звуковой и сверхзвуковой скоростями; значительные импульсные перемещения объемов жидкости, совершающиеся со скоростями, достигающими сотен метров в секунду; мощные импульсно возникающие кавитационные процессы, способные охватить относительно большие объемы жидкости; инфра- и ультразвуковые излучения; механические резонансные явления с амплитудами, позволяющими осуществлять взаимное отслаивание друг от друга многокомпонентных твердых тел; мощные электромагнитные поля (десятки тысяч эрстед); интенсивные импульсные световые, тепловые, ультрафиолетовые, а также рентгеновские излучения; импульсные гамма- и (при очень больших энергиях импульса) нейтронное излучения; многократная ионизация соединений и элементов, содержащихся в жидкости.

Все эти факторы позволяют оказывать на жидкость и объекты, помещенные в нее, весьма разнообразные физические и химические воздействия [19]. Так, ударные перемещения жидкости, возникающие при развитии и схлопывании кавитационных полостей, способны разрушать неметаллические материалы и вызывать пластические деформации металлических объектов, помещенных вблизи зоны разряда. Мощные инфра- и ультразвуковые колебания, сопровождающие электрогидравлический эффект, дополнительно диспергируют уже измельченные материалы, вызывают резонансное разрушение крупных объектов на отдельные кристаллические частицы, осуществляют интенсивные химические процессы синтеза, полимеризации, обрыва сорбционных и химических связей. Электромагнитные поля разряда также оказывают мощное влияние как на сам разряд, так и на ионные процессы, протекающие в окружающей его жидкости. Под их влиянием могут происходить разнообразные физические и химические изменения в обрабатываемом материале.

Понятие жидкости как среды для возникновения электрогидравлических ударов должно быть расширено на все эластичные и даже твердые (например, сыпучие) материалы.

Форма разряда, вызывающая возникновение импульсных давлений, может быть самой разнообразной: искровой, кистевой, совсем без кистей (так называемый импульсный электрический ветер).

Основой, обеспечивающей многообразные технологические возможности электрогидравлического эффекта, является метод получения так называемых сверхдлинных искровых разрядов в проводящих жидкостях [4, 7]. Электрогидравлический эффект может быть получен и в результате предложенного нами метода

«теплового взрыва» [23], при котором искровой разряд между электродами, помещенными в жидкость, заменяется электрическим тепловым взрывом проводящего ток элемента, замыкающего электроды. Использование этого метода позволяет распространить область электрогидравлической обработки на высокотемпературные среды, в том числе на плазму и расплавы солей и металлов.

Высокий КПД электрогидравлического эффекта, а также уникальные возможности электрогидравлического воздействия являются основой для широкого применения электрогидравлического эффекта во всех областях народного хозяйства

1.2. Принципиальная электрическая схема получения электрогидравлического эффекта

Начиная с 1933 г., исследовались явления, возникающие в зоне высоковольтного искрового разряда в жидкой среде. В начальной стадии эти исследования подтвердили существующие данные о том, что такой разряд легко возникает только в диэлектрических жидкостях, а в жидкостях с ионной проводимостью происходит лишь в случаях очень малой длины искрового промежутка и всегда сопровождается обильным газо- и парообразованием.

Механическое воздействие жидкости на объекты, помещенные вблизи канала разряда, получаемого по традиционной схеме с прямым подключением конденсатора на разрядный промежуток в жидкости, практически ничтожно для жидкостей с ионной проводимостью и сравнительно ощутимо лишь в среде жидких диэлектриков. Оно определяется весьма незначительными давлениями внутри парогазового пузыря, возникающего вокруг зоны разряда. Создающиеся в жидкости гидравлические импульсы имеют пологий фронт и значительную длительность протекания, при этом обладают небольшой мощностью.

В связи с этим необходимо было найти условия, в которых действие гидравлических импульсов могло бы быть резко усилено. Для этого требовалось уменьшить толщину парогазовой оболочки и сократить продолжительность разряда, в течение которого она создается. Одновременно необходимо было повысить мощность единичного импульса.

Решить эту задачу оказалось возможным путем разработки принципиальной электрической схемы, которая обеспечила подачу тока на рабочий промежуток в виде короткого импульса при помощи мгновенного «ударного» подключения накопителя энергии.

С этой целью автором был введен в электрическую схему формирующий воздушный искровой промежуток, что позволило в жидкостях с ионной проводимостью изменить характер искрового разряда, резко усилить его механическое действие [7, 14].

Дополнительный формирующий воздушный промежуток позволяет накапливать заданное количество энергии с импульсной

подачей ее на основной промежуток; значительно сократить длительность импульса и предотвратить возникновение колебательных процессов; создавать крутой фронт импульса, исключая возможность перехода к дуговому разряду; получать при заданном основном межэлектродном промежутке любые из допустимых для используемого источника питания значения тока и напряжения; регулированием длины формирующего промежутка изменять форму импульса и характер разряда на основном рабочем промежутке в жидкости. Именно формирующий промежуток явился обострителем импульса тока, позволившим перейти к напряжениям гораздо бо́льшим, чем напряжение пробоя рабочего промежутка в жидкости

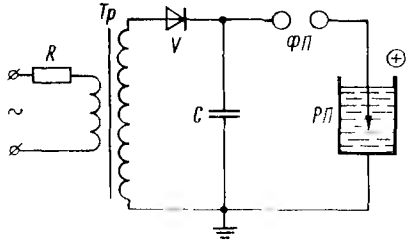


Рис. 1.1. Электрическая схема для воспроизведения ЭГЭ с одним формирующим промежутком (*R* — зарядное сопротивление, *Тр* — трансформатор; *V* — выпрямитель; *ФП* — формирующий искровой промежуток; *РП* — рабочий и искровой промежуток в жидкости; *C* — рабочая емкость — конденсатор)

Таким образом, для создания электрогидравлических ударов была предложена схема (рис. 1.1), включающая источник питания с конденсатором в качестве накопителя электрической энергии. Напряжение на конденсаторе повышается до значения, при котором происходит самопроизвольный пробой воздушного формирующего промежутка, и вся энергия, запасенная в конденсаторе, мгновенно поступает на рабочий промежуток в жидкости, где и выделяется в виде короткого электрического импульса большой мощности. Далее процесс при заданных емкости и напряжении повторяется с частотой, зависящей от мощности питающего трансформатора.

Автором также была предложена схема с двумя формирующими промежутками. Как оказалось, введение двух формирующих искровых промежутков позволяет получить некоторое повышение крутизны фронта импульса, а главное, делает схему симметричной, более управляемой и безопасной в обращении (рис. 1.2). Но, поскольку при этом возрастание крутизны фронта импульса невелико, а сложность изготовления схемы повышена, на практике ее почти не применяют.

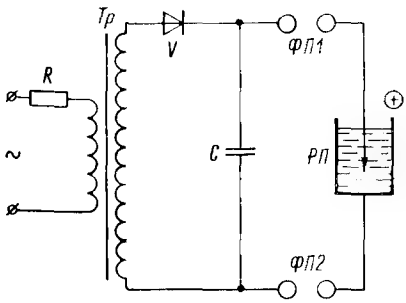


Рис. 1.2. Электрическая схема для воспроизведения ЭГЭ с двумя формирующими промежутками

В дальнейшем автором были предложены и другие схемы (см. гл. 3). Однако формирующий промежуток (в различных его модификациях, например, в виде

игнитрона) применяют во всех современных электрогидравлических силовых установках.

Опытным путем была установлена возможность широкого варьирования параметрами принципиальной электрической схемы, воспроизводящей электрогидравлический эффект. Это дало основание ввести понятие «режим работы» силовой установки, подразумевая под этим значения основных параметров схемы: емкости и напряжения [3, 6]. Были определены три основных режима: *жесткий* $U \geqslant 50$ кВ; $C \leqslant 0{,}1$ мкФ; *средний* – 20 кВ $\leqslant U \leqslant 50$ кВ; 0,1 мкФ $< C < 1{,}0$ мкФ; *мягкий* $U < 20$ кВ, $C \geqslant 1{,}0$ мкФ.

1.3. Явления, происходящие в жидкости при электрогидравлическом эффекте

Автор впервые наблюдал электрогидравлический эффект в открытом сосуде, заполненном жидкостью (водой). Уже в ходе первых экспериментальных исследований было установлено, что при пробое жидкости по схемам, представленным на рис. 1.1 и 1.2, вокруг канала разряда возникает зона высокого давления, диаметр которой пропорционален мощности импульса. Высокие гидравлические давления по мере удаления от разряда быстро падают, примерно пропорционально квадрату расстояния от него.

Жидкость, получив ускорение от расширяющегося с большой скоростью канала разряда, перемещается от него во все стороны, образуя на том месте, где был разряд, значительную по объему полость, названную кавитационной, и вызывая первый (основной) гидравлический удар. Затем полость также с большой скоростью смыкается, создавая второй кавитационный гидравлический удар. На этом единичный цикл электрогидравлического эффекта заканчивается, и он может повторяться неограниченное число раз соответственно заданной частоте следования разрядов [7, 14].

Развитие искрового разряда во времени происходит путем последовательного «прорастания» стримеров в межэлектродном промежутке. Растущий стример, как правило, состоит не из одного, а из многих каналов с многочисленными ответвлениями от них. Рост каждого отдельного «уса» стримера является ступенчато прерывным процессом и представляет собой последовательное разряжение гидроксильных ионов OH^- из все новых и новых и довольно значительных объемов жидкости, лежащих на пути стримера. Характер и последовательность процесса для нескольких этапов развития приведены на рис. 1.3, *а–в*.

Если рассмотреть падение напряжения только на одном усе стримера, то оно имеет характерную ступенчатость, но, поскольку рост отдельных усов происходит несинхронно с другими, эта ступенчатость взаимно перекрывается, становится слабовыраженной, а для всего процесса в целом даже совсем исчезает [3]. Образовавшийся канал стримера проходит в области, имеющей лишь разрядившиеся ионы OH^- и нейтральные к процессу роста

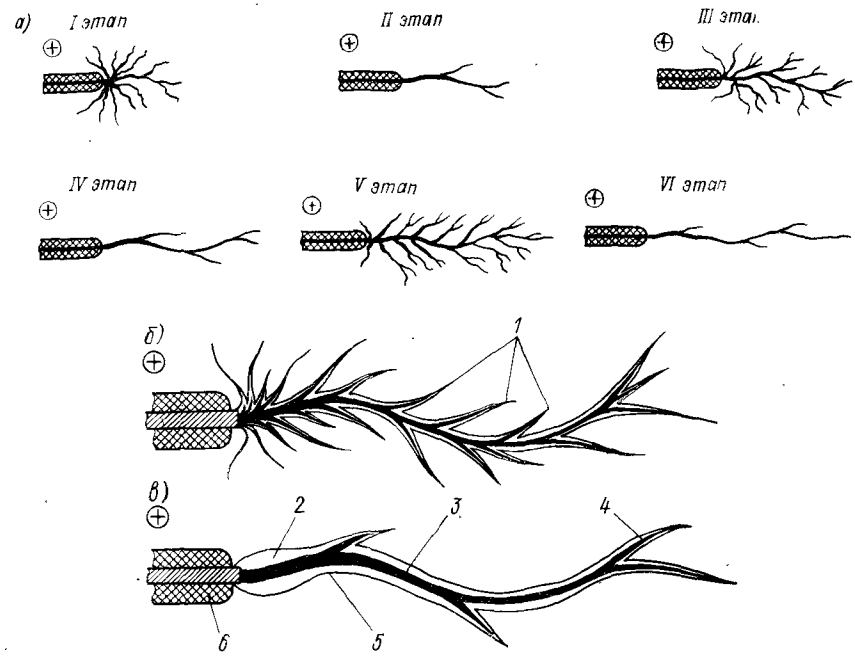


Рис. 1.3 Принципиальная схема развития растущего стримера и окружающей его, преимущественно газовой, оболочки: *а* – этапы ступенчатого развития-прорастания стримера (*I* – *VI*); *б* — схема процесса для момента *V* этапа; *в* — схема процесса для момента *VI* этапа;
1 — отдельные боковые «усы» стримера, *2* — оболочка у основания стримера, *3* — главный канал стримера; *4* — канал уса стримера; *5* — оболочка; *6* — электрод

стримеров ионы H^+, т. е. в области электрически нейтральной, электрически изолирующей канал от окружающей среды.

В процессе роста стримеров возникает основная масса тех газообразных продуктов, из которых в дальнейшем образуется парогазовая рубашка канала искрового разряда. Пузырьки газов, образующиеся в жидкости на усах стримеров при их росте, существуют относительно долго и даже тогда, когда тот или иной ус уже исчезает. Эти пузырьки могут довольно ярко светиться желто-оранжевым или фиолетово-розовым цветом под влиянием собственных полей разряда. При некотором навыке их можно наблюдать визуально.

При некоторых значениях параметров импульса могут возникать самые различные формы искрового канала, связанные с неполным его образованием. Канал может существовать, например, как составленный из ярко-белой «толстой» и слабосветящейся розово-фиолетовой «тонкой» частей. Иногда также при определенных значениях параметров импульса можно наблюдать и появление «перистого» стримера, идущего от отрицательного электрода к положительному.

При прохождении стримера через жидкость (в рассматриваемом случае через воду) ионы жидкости, разряжаясь на растущий стример как на «выдвижной» электрод, образуют на уже возникшей его поверхности (кроме непрерывно растущего переднего конца) тонкую газовую пленку, отделяющую уже оформившийся ствол или ветвь стримера от окружающей жидкости. Таким образом, происходит своеобразное явление, названное автором явлением самоизоляции разряда, способствующее увеличению эффективности всего процесса. Изолирующую пленку образуют атомарные и молекулярные кислород и водород, газообразная перекись водорода, а также электрически нейтральные свободные радикалы H, OH, существующие в парах воды. Поскольку рост стримера совершается не только в пространстве, но и во времени, то его «основание» — у острия положительного электрода оказывается «старше» его «вершины» — продолжающего расти конца стримера. Таким образом, газовая оболочка «рубашка» стримера, – также развивающаяся во времени, оказывается более «толстой» там, где время ее существования больше. Кроме того, из острия положительного электрода при формировании разряда отходит значительное количество усов, исчезающих после образования главного канала. При исчезновении этих стримеров их газовые оболочки стягиваются с них в основном в оболочку будущего «главного» стримера, еще более увеличивая ее толщину вблизи его «основания» (см. рис. 1.3).

По-видимому, в разрядах молнии, имеющих канал разряда, достигающий иногда 10 км и более, описанное выше явление «самоизоляции» разряда единственно способно объяснить прорастание стримеров на «сверхдлинные» расстояния, которые могут проходить лидеры и главный канал разряда молнии при совершенно недостаточных для этого напряжениях. Расширяющийся канал стримера молнии вытесняет из занятого им объема воздух и пары воды на периферию канала в его оболочку. Таким образом, получается своеобразное сходство двух, казалось бы, совершенно разнородных явлений. По сути дела и разряд обычной молнии, и разряд, создающий явление электрогидравлического эффекта, возникают... в воде. Только в одном случае канал разряда окружает большой объем воды, а в другом — только тонкая паровоздяная пленка. Однако на характер процесса это, по-видимому, почти не влияет, и поэтому закономерности развития обоих процессов чрезвычайно сходны между собой.

Известно, что длинные (особенно сверхдлинные) молнии бывают, как правило, «положительными», т. е. такими, стримеры которых развиваются от положительного электрода, а электроны, следовательно, движутся к нему, что непосредственно вытекает и из предложенного здесь понимания процесса. Исходя из аналогичных представлений, следует допустить, что «отрицательные» молнии должны иметь много общего с реверсивными разрядами, описываемыми ниже.

С момента образования стримера в жидкости между электродами начинается и первый этап существования кавитационной полости. В этот период полость представляет собой тонкую трубку, окружающую канал стримера. Своим существованием она обязана выделяющимся на поверхности канала и сливающимся между собой пузырькам газов. При этом внутри этой трубки давления будут относительно малы.

Подлинный рост полости начинается только вместе с ростом диаметра канала разряда при переходе его в искровую форму с наступлением собственно пробоя (после того, как стример замкнет оба электрода). Резкое повышение температуры канала (до 40 000 °С и более) вызывает появление дополнительного количества продуктов разложения самой жидкости и находящихся в ней веществ в оболочке канала, что и определяет еще более резкий скачок давлений в ней. Огромное сопротивление процессу расширения со стороны окружающей канал жидкости способствует еще более резкому нарастанию давлений в оболочке канала, в силу чего явление приобретает характер взрыва.

Жидкости сообщаются все бóльшие и бóльшие ускорения, и она разлетается в стороны от линии канала разряда, образуя полость. При этом не следует забывать, что оболочка канала (преимущественно газовая у стримера и парогазовая у искрового разряда) является электрической и тепловой изоляцией канала от окружающей среды, в том числе и от потерь тепла при лучеиспускании. Однако процесс протекает при давлениях, значения которых заведомо превышают критические, при которых исчезает разница между паром и жидкостью, а поэтому пар как таковой в этой оболочке либо не появляется вообще, либо появляется в том случае, когда при некоторых параметрах импульсов его существование становится возможным. Характеризуя состояние вещества в парогазовой рубашке канала, следует предположить его неоднородным и плавно переходящим от состояния плазмы к состоянию нормальной жидкости по мере удаления рассматриваемого участка слоя от оси канала.

Передача энергии жидкости через тонкий слой эластичной парогазовой рубашки совершается не только в тот период, когда диаметр канала растет, но и некоторое время спустя, после того как этот рост прекратится. С увеличением диаметра канала разряда толщина слоя парогазовой рубашки его растет непропорционально этому увеличению, по сути дела она остается постоянной, а при некоторых режимах даже уменьшается. Именно этим обстоятельством обеспечивается постоянство условий передачи давлений в окружающую жидкость не только на стадии расширения канала, но и в течение некоторого времени после того, как его рост прекратится.

При образовании кавитационной полости (в начальный период ее расширения) от границ этой полости отрывается и уходит в жидкость ударная волна. По мере ее движения энергия, которую

Областная библиотека

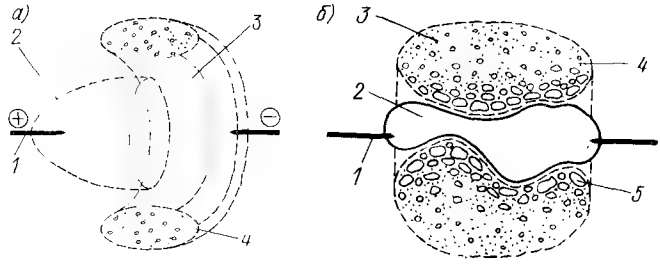


Рис. 1.4. Схема кавитационных явлений при электрогидравлическом эффекте: *а* — момент возникновения кавитирующего кольца при захлопывании полости, *б* — характер искажения полости под влиянием кавитирующего кольца; *1* — электроды, *2* — кавитационная полость, *3* — кавитирующее кольцо; *4* — пузырьки кавитации, *5* — растянутые пузырьки

она несет, перекачивается на задний фронт волны. Когда граница кавитационной полости останавливается в своем движении и полость захлопывается, энергия сжатой жидкости постепенно переходит на передний фронт обратной волны, т. е. на границу полости. Это обстоятельство является причиной того, что почти вся энергия разряда, отошедшая к полости (т. е. энергия запаздывающего потока), в течение каждого цикла возникновения и захлопывания полости практически не покидает сравнительно небольшой объем жидкости вблизи зоны разряда.

В начальный момент захлопывания полости в окружающей ее жидкости возникает все время расширяющаяся сферическая граница раздела движений жидкости, еще продолжающей двигаться от полости, и жидкости, уже начавшей двигаться к захлопывающейся полости [3]. Здесь образуется кавитирующее кольцо - сотни тысяч пузырьков обычных кавитаций, располагающихся тороидом, лежащим в плоскости, перпендикулярной к линии разряда по ее середине (рис. 1.4,*а*). По мере расширения верхней границы этой области и по мере удаления ее от полости разрывающие жидкость усилия постепенно ослабевают и наконец исчезают, что и определяет верхнюю границу существования кавитирующего кольца. Внутренняя (нижняя) граница кольца определяется диаметром той начальной области, где прежде всего проявились разрывающие жидкость усилия, однако эта нижняя граница выражена менее резко.

Кавитирующее кольцо играет очень большую роль в процессе захлопывания кавитационной полости. Отдельные пузырьки кольца, находящиеся вблизи полости, под влиянием растягивающих усилий расширяются быстрее других, и сжимающаяся полость при этом как бы растягивает их, в силу чего ее в общем правильная сферическая поверхность искажается и захлопывающаяся полость приобретает самые причудливые формы. На рис. 1.4,*б* показан один из возможных случаев такого искажения полости. В результате при захлопывании полости могут возникать местные

скачки давления, во много раз превышающие те давления, при которых полость возникала.

Кавитационное кольцо, захватывающее очень большой объем жидкости, является тем основным фактором, который, если говорить только о влиянии кавитации, определяет многие химические процессы, происходящие при электрогидравлическом эффекте.

Свойства кавитационной полости, образующейся при различных параметрах разряда, могут существенно различаться. Так, например, при работе на малых емкостях (жестких режимах) полость почти лишена продуктов газо и парообразования и потому заметной плавучестью не обладает. Только при работе на больших емкостях (мягких режимах) значительное количество образующихся при этом газов и паров может придать полости некоторую плавучесть. Кроме того, из-за различия в плотности верхних и нижних слоев жидкости в зоне разряда при образовании полости верхние слои над разрядом, сжимаясь в одинаковой степени с нижними, тем не менее перемещаются от линии разряда значительно дальше нижних, в связи с чем полость в верхней своей части искажается, становится несимметричной и при захлопывании испытывает со стороны результирующих сил значительное итоговое усилие, направленное сверху вниз. Таким образом, полость при работе на жестких режимах будет тонуть, совершая при этом одну (реже две) пульсацию.

При работе на мягких режимах при небольших энергиях импульса полость также будет тонуть, но уже после нескольких пульсаций. Лишь при больших энергиях импульса (на мягких режимах), когда ее собственная плавучесть окажется больше внешних усилий со стороны результирующих сил, захлопывающих полость, после многих пульсаций, и одновременно с ними полость будет всплывать.

Существует простой способ, позволяющий визуально наблюдать кавитационную полость. В качестве источника питания лучше всего воспользоваться генератором импульсного тока небольшой мощности. Регистрацию возникающих разрядов (длиной около 40 мм) необходимо вести в закрытой ванне из органического стекла, соединенной с вакуумным насосом. Источник света следует расположить так, чтобы наблюдать в проходящем и отраженном свете возникновение, захлопывание, пульсацию и всплытие образующейся полости (диаметром около 25 мм). Полость в этом случае не увеличивается более указанных размеров, потому что количество газа и пара в ней ничтожно мало. При пульсациях она сужается до 5—8 мм, что свидетельствует о присутствии в ней газов и паров, количество которых может быть достаточно точно измерено. То, что полость всплывает до поверхности жидкости, совершая пульсации, подтверждает вышеизложенные причины возникновения тонущих и всплывающих полостей. На рис. 1.5 приведена схема наблюдаемых в опыте процессов.

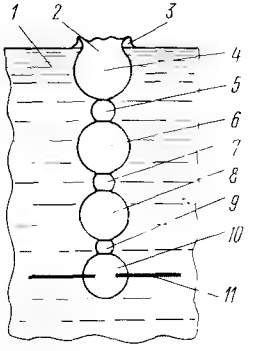


Рис. 1.5. Схема процесса пульсации кавитационной полости:

1 жидкость; *2* — прорыв полости, *3* — всплески краев полости, *4, 6, 8, 10* и *5, 7, 9* — этапы развития полости в моменты расширения и сжатия соответственно, *11* — электроды

При осуществлении последовательного ряда импульсных разрядов в жидкости каждый последующий электрогидравлический удар может возникнуть только после того, как кавитационная полость от предыдущего разряда успеет захлопнуться, что и определяет возможную максимальную частоту разрядов электрогидравлической установки.

Электрогидравлический удар даже в очень больших объемах жидкости вызывает появление давлений в десятки и сотни тысяч атмосфер, т. е. на два-четыре порядка выше давлений в канале разряда. Однако это противоречие немедленно исчезает, если полагать, что указанные выше давления в канале разряда являются только средними давлениями, не распространяющимися равномерно на весь канал.

Известно, что давления в жидкости при осуществлении электрогидравлических ударов возникают вследствие передачи жидкости энергии от расширяющегося в ней с космической скоростью канала разряда. Расширение происходит за время несколько большее, чем длительность фронта первой полуволны импульса тока. Этот период характеризуется чрезвычайно быстрым нарастанием собственного магнитного поля разряда и резко выраженными явлениями скин-эффекта, сопровождающимися перекачкой почти всей энергии, которую несет канал разряда на его периферию, и образованием на нем так называемой «скиновой рубашки» — материально-энергетической оболочки с давлениями в ней, на один-два порядка превышающими те, которые затем возникнут и будут зарегистрированы в жидкости. От оболочки к центру разряда давление падает настолько быстро, что в некоторых случаях в центре канала может образоваться вакуум (отсюда средние давления в канале разряда сравнительно невелики).

Скиновая оболочка разряда окружена исчезающе малой парогазовой оболочкой - «ионной рубашкой», являющейся демпфером, резко снижающим механический КПД разряда. Поэтому уменьшение толщины этой ионной рубашки является одним из наиболее перспективных путей повышения механического КПД разряда. Принципиальная схема структуры канала разряда и характер распределения давления в канале и окружающей его жидкой среде приведены на рис. 1.6.

Принципиальная осциллограмма совмещенных графиков импульсов тока и напряжения на рабочем искровом промежутке в жидкости приведена на рис. 1.7. Весь процесс воспроизведения

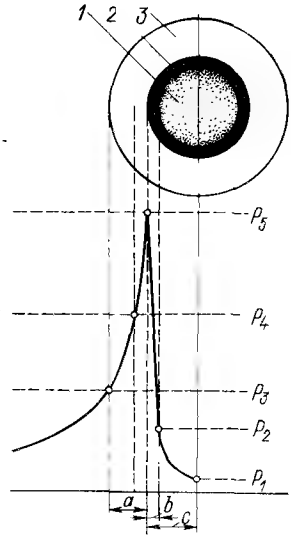


Рис. 1.6. Принципиальная схема структуры канала разряда и распределения давления в нем ($P_1 - P_5$ давления в соответствующих зонах: $P = 0 \div 2 \times \times 10^6$ Па; P_2 до $2 \times \times 10^8$ Па, P_3 — до $5 \times \times 10^9$ Па, P_4 — до 10^{10} Па; P_5 — до $2 \cdot 10^{10}$ Па; a — толщина парогазовой оболочки, $a = 0{,}001 \div 0{,}1$ мм; b — толщина скиновой оболочки; $b = 10^{-5} \div 10^{-3}$ мм; c — радиус канала разряда, $c = 0{,}5 \div 5{,}0$ мм): *1* — центральная часть канала разряда; *2* — скиновая рубашка оболочка канала, *3* — парогазовая оболочка

электрогидравлического эффекта разделим на пять основных периодов (стадий) см. *а* – *е* на рисунке. В табл. 1.1 приведены обобщенные и усредненные данные о длительности стадий разряда для разных режимов.

На *предразрядной стадии* пробой шаров формирующего искрового промежутка или другого коммутирующего устройства приводит к резкому повышению напряжения на рабочем искровом промежутке. Напряжение мгновенно возрастает (начальный, круто поднимающийся участок кривой напряжения) от нуля до возможного для данного случая максимального значения. После достижения им некоторого значения, достаточного для лавинной ионизации, в жидкости начинают расти стримеры. Визуально стримеры растут от положительного электрода к отрицательному (фактически — из объема жидкости в положительный электрод). На рост стримеров расходуется энергия, и поэтому на этом участке кривой наблюдается небольшое (обычно не более 2 – 10 %) падение напряжения. Рост стримеров сопровождается появлением тока в канале стримера, что фиксируется осциллограммой в виде полого поднимающейся части кривой тока.

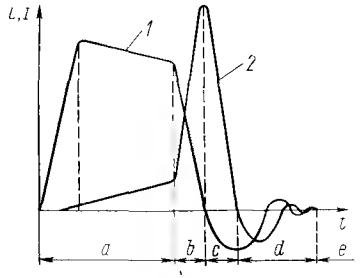


Рис. 1.7. Схема совмещенных графиков импульсов тока и напряжения (*а* — предразрядная стадия; *b* — стадия переднего фронта; *c* стадия заднего фронта; *d* — стадия последующих полуволн; *e* — стадия затухания реакций): *1* — напряжение (U); *2* — ток (I)

Таблица 1.1

Длительность протекания стадий разряда при различных режимах работы ГИТ

Стадия	Длительность на режимах, мкс		
	жестких	средних	мягких
Предразрядная (*a*)	0,00003—0,3	0,03—30,0	3,0—300,0
Переднего фронта (*b*)	0,000005—0,05	0,005—5,0	0,5—50,0
Заднего фронта (*c*)	0,000015—0,15	0,015—15,0	1,5—150,0
Последующих полуволн (*d*)	0,00005—0,5	0,05—50,0	5,0—500,0
Затухания реакций (*e*)	От нескольких секунд до многих часов и дней		

Примечание. Средняя длительность разряда составляет на жестких режимах 0,00001—1,0, на средних — 0,1—100,0 и на мягких — 10,0—1000,0 мкс.

Давления в период предразрядной стадии невелики (вблизи канала стримера не превышают 50 МПа). Перемещения жидкости также невелики, практически их почти нет. Кавитирующего кольца нет. Звуковое и световое излучения выражены очень слабо. Действует быстро нарастающее мощное электрическое поле. Магнитное поле ничтожно мало. Как только один из стримеров дорастает до второго электрода, предразрядная стадия заканчивается.

На *стадии переднего фронта* в канал стримера устремляется вся накопленная в конденсаторе энергия, ток быстро растет, достигая максимальных значений, что приводит к увеличению диаметра канала. Давления в канале резко нарастают и также достигают максимальных значений. Температура канала повышается до $4 \cdot 10^4$ °С и более. Одновременно наблюдается резкое падение напряжения. Перемещения жидкости только начинаются, но вблизи зоны разряда они максимальны по ускорениям. Кавитационные процессы практически отсутствуют. Звуковое излучение нарастает, достигая максимума, но кавитации от его действия еще не выражены. Действует очень мощное, быстро нарастающее магнитное поле. Световое излучение достигает максимума во всем диапазоне частот, свойственных данному режиму.

На *стадии заднего фронта* процесс становится колебательным, ток и напряжение, проходя через нуль и меняя знаки, быстро уменьшаются. Давления начинают резко падать. Перемещения жидкости достигают максимальной скорости, начинается образование кавитирующего кольца. Звуковое (и световое) излучение уменьшается, однако связанные с ним кавитационные процессы растут, нарастает также электрическое поле другого знака, стягивается и уменьшается магнитное поле.

На *стадии последующих полуволн* в колебательном контуре с большим затуханием, каким является настроенный на близкую к апериодической форме разряда контур нашей схемы, обычно возникает не более двух-трех полуволн быстро затухающих колебаний. Эти колебания и составляют стадию последующих полуволн. Давления продолжают падать, испытывая флуктуации, перемещения жидкости достигают максимума по расстояниям. Бурно развиваются, пройдя через максимум и постепенно убывая, процессы кавитации в кавитирующем кольце. Звуковое излучение, испытывая флуктуации, уменьшается, резко ослабевают и связанные с ним процессы кавитации. Электрические и магнитные поля то убывают, то возрастают (с изменением знаков). Световое излучение интенсивно затухает.

На *стадии затухания реакций* давления, так же как и перемещения жидкости, практически исчезают. Однако на поверхности жидкости (в зависимости от размера резервуара и толщины слоя жидкости над разрядом) наблюдается существующее в течение некоторого времени волнение жидкости. Кавитационные процессы затухают. Остаточные электрические и магнитные поля, существование которых в течение этой стадии было обусловлено остаточными объемными зарядами в жидкости, по мере их выравнивания, исчезают. Возможное послесвечение (если какие-либо элементы жидкости могли флюоресцировать) исчезает. Стадия характеризуется быстро протекающими рекомбинационными процессами.

Отметим, что в момент возникновения пробоя на рабочем искровом промежутке одновременно оказывается замкнутым не только разрядный, но и зарядный контур схемы, следовательно, на рабочий искровой промежуток поступает не только ток разрядного контура, но через выпрямитель — и ток трансформатора, величина которого ничтожно мала по сравнению с основным током в разрядном контуре схемы, но он все же вносит свою долю искажений в осциллограммы тока и напряжения, снимаемые на рабочем искровом промежутке. Во всяком случае, при полном устранении этого тока, «прорывающегося» в разрядный контур, вид осциллограмм (особенно для малых мощностей импульсов) заметно изменяется.

Трансформация электрической энергии в работу совершается в основном в интервале стадий переднего и частично заднего фронтов, захватывая конец предразрядной стадии и начало стадии последующих полуволн.

1.4. Особенности электрогидравлического эффекта. Магнитное поле разряда

Одним из существенных факторов, сопровождающих процесс трансформации энергии, является магнитное поле разряда. Очень слабое за время всей предразрядной стадии, в период стадии

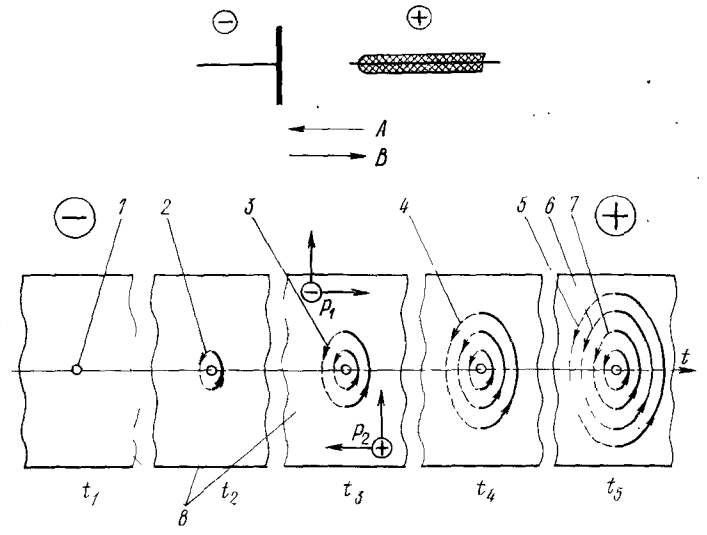


Рис. 1.8. Схема развития во времени процесса нарастания магнитного поля внутри канала разряда (*A* — каноническое направление тока; *B* – фактическое направление движения электронов; P_1 и P_2 – направление движения отрицательных и положительных зарядов под влиянием сил скин-эффекта): *1* -*5* – этапы расширения одной и той же магнитной силовой линии (за время $t_1 - t_5$); *6*, *7* — 2-я, 3-я и последующие магнитные силовые линии, выходящие из канала; *8* — последовательное развитие процессов внутри одного и того же участка канала разряда за время t_1, t_2, t_3

переднего фронта оно достигает максимума, убывает до нуля в течение стадии заднего фронта и, проходя через нуль несколько раз и изменяя свое направление, исчезает за время стадии последующих полуволн. Определяющее влияние на разряд оно оказывает только на стадиях переднего и заднего фронтов.

На стадии переднего фронта напряженность магнитного поля нарастает, что характеризуется увеличением его плотности в центре канала и ослаблением плотности по мере удаления от него. Естественно, что магнитное поле должно влиять не только на процессы перемещения зарядов, совершающиеся внутри канала разряда, но и на процессы, происходящие в окружающей канал среде (парогазовой оболочке, жидкости или иной среде), в которой осуществляется электрогидравлический эффект.

На рис. 1.8 приведена схема развития во времени процесса нарастания магнитного поля внутри канала разряда, взятая для точки, находящейся в центре канала и расположенной на оси ординат. При этом принято, что электроны в канале движутся вдоль этой оси слева направо. Тогда направление силовых линий магнитного поля будет таким, какое указано стрелками. Нарастающее магнитное поле выталкивает отрицательные заряды, движущиеся по каналу вправо (от оси канала на периферию), а положительные, если они есть и движутся при этом влево, стягивает

внутрь, к его оси. Таким образом, нарастающее магнитное поле вызовет образование на поверхности разряда тонкой оболочки с высокой плотностью энергии в ней, прямо пропорциональной крутизне нарастания поля. Это явление, известное как скин-эффект, изучено для высокочастотных токов, где оно имеет большое практическое значение. Однако импульсы, обеспечивающие осуществление электрогидравлического эффекта, по сути дела представляют собой не что иное, как один полупериод какого-то условно высокочастотного тока с частотой несколько десятков килогерц. Другими словами, известные закономерности, характерные для высокочастотных токов, оказываются справедливыми и для данного случая. Отсюда становится очевидным определяющее влияние скин эффекта на все процессы трансформации энергии.

Выталкивая заряды на периферию канала, скин-эффект создает скиновую оболочку канала, чем обеспечивает и облегчает идущую только через поверхность канала отдачу энергии вовне, непрерывно удаляя ее из центральных областей канала.

Скиновая оболочка канала (с давлениями в ней до $2 \cdot 10^4$ МПа и выше) определяет за время расширения канала ($10^{-3} - 10^{-2}$ с) передачу давлений окружающей канал жидкости. То, что может «раздвинуть» жидкость, преодолев существующие в ней внутренние давления (составляющие примерно 10^3 МПа), должно иметь собственные давления, бо́льшие существующих в жидкости, и скиновая оболочка их имеет. Таким образом обеспечивается высокий механический коэффициент полезного действия трансформации энергии.

На рис. 1.9 приведена схема развития (во времени) процесса нарастания магнитного поля при воздействии его на заряды, движущиеся вне канала (A, B, P_1, P_2 те же, что и на рис. 1.8). Подобное нарастание магнитного поля вызывает стягивание к каналу всех отрицательных зарядов и удаление в стороны от канала всех положительных ионов. Это имеет важное практическое значение – способствует процессу самоизоляции разряда и росту его энергии.

Совершенно другая картина будет в том случае, когда магнитное поле разряда станет спадать. На рис. 1.10 приведена схема развития (во времени) процесса убывания магнитного поля внутри канала разряда. Из схемы видно, что убывающее магнитное поле стягивает к центру канала все отрицательные и выталкивает на периферию канала все положительные заряды. Это явление, известное как пинч-эффект, будет разрушать скиновую оболочку канала, заменяя ее энергоемкой ионной рубашкой со значительно меньшими давлениями в ней. Таким образом, явление пинч-эффекта играет в процессе трансформации энергии и увеличении его КПД явно отрицательную роль, поэтому уменьшение или устранение влияния пинч-эффекта имеет большое практическое значение.

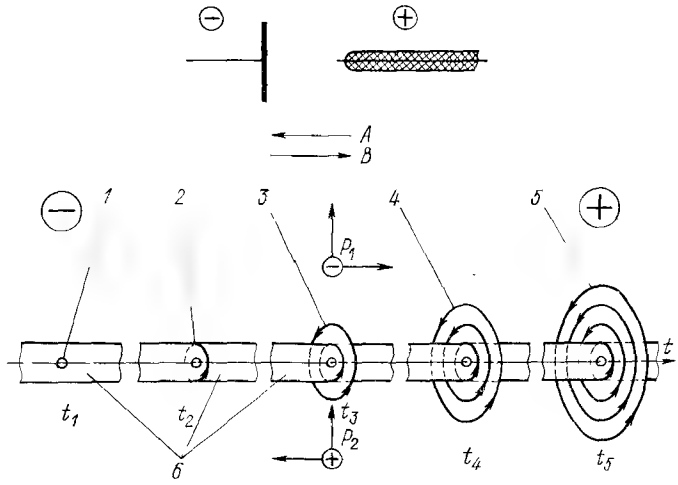


Рис. 1.9. Схема развития процесса нарастания магнитного поля вне канала разряда:

1—5 — этапы расширения одной и той же магнитной силовой линии за время $t_1 - t_5$; *б* — последовательное развитие процессов вокруг одного и того же участка канала разряда (за время $t_1 - t_3$)

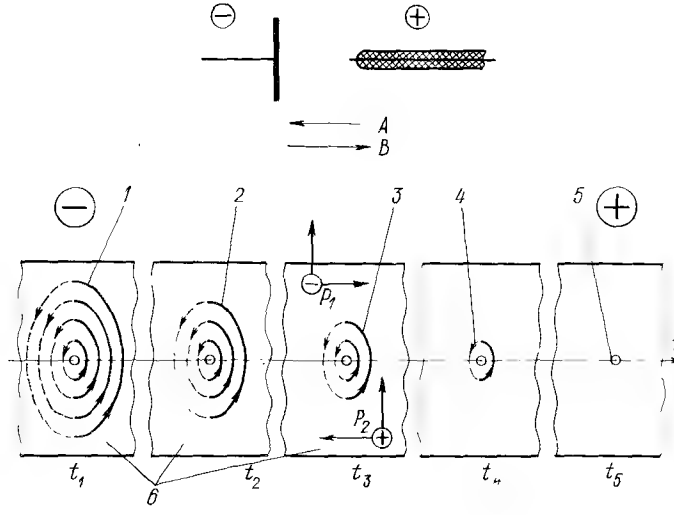


Рис. 1.10. Схема развития процесса убывания магнитного поля внутри канала разряда

1—5 — этапы сжатия одной и той же магнитной силовой линии за время $t_1 - t_5$; *б* — последовательное развитие процессов внутри одного и того же участка канала разряда (за время $t_1 - t_3$)

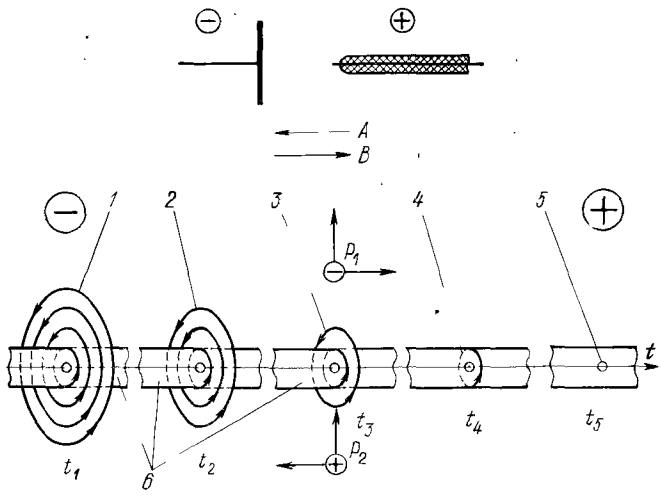


Рис. 1.11. Схема развития процесса убывания магнитного поля вне канала разряда:

1–5 – этапы стягивания одной и той же магнитной силовой линии за время $t_1 - t_5$); *6* — последовательное развитие процессов вокруг одного и того же участка канала разряда за время $t_1 - t_5$

Однако, поскольку длительность стадии заднего фронта значительно больше длительности стадии переднего фронта, а следовательно, и крутизна спада поля значительно меньше крутизны его нарастания, то в процессе разряда скин эффект и его влияние оказываются во много раз сильнее влияния пинч-эффекта, поскольку значение каждого из них растет прямо пропорционально крутизне нарастания (скин эффект) или спада (пинч эффект) интенсивности магнитного поля.

Примером этого является поведение рабочего электрода электрогидравлических устройств в случае, когда он выполнен из тонкой и жесткой волоченой стальной проволоки с большими внутренними напряжениями в ней. Под влиянием скин-эффекта проволока электрода разрывается по длине на три-четыре части, а затем действием кавитационных ударов заворачивается назад. Силы пинч-эффекта оказываются не в состоянии сжать разорванные части и предотвратить этим их закручивание. Влияние скин-эффекта на разряд можно наблюдать и визуально (при длинной искре в закрытом объеме, из которого можно удалить воздух). Наблюдения при этом обязательно должны вестись только при небольшом вакууме.

На рис. 1.11 приведена схема развития процесса убывания (спада) магнитного поля вне канала разряда в окружающей канал жидкости. Убывающее магнитное поле вызывает вытеснение движущихся отрицательных зарядов во все стороны от канала разряда и стягивание положительных зарядов к поверхности канала.

Все это несколько улучшает электрическую изоляцию канала разряда, но на этой стадии (заднего фронта) существенного значения не имеет и на процесс трансформации энергии не влияет.

На стадии последующих полуволн в случае, если форма импульса далека от апериодической и более похожа на колебательную, возможно повторное возникновение достаточно мощного скин-эффекта с сопутствующим ему процессом образования скиновой оболочки и т. д. Поскольку каждая полуволна тока разряда может образовать одну «вспышку» появления такой высокоэнергетической оболочки, то практически с каждой полуволной в канале разряда может появляться, отрываться от его оси и уходить к его периферии (и даже в жидкость) ударная волна. Внешне это выглядит как некоторая периодическая «подпитка» энергии, выделяемой каналом, а следовательно, и «подпитка» ударной волны, образованной расширяющимся каналом в жидкости.

Значительный интерес представляет исследование влияния нарастающего или спадающего магнитного поля на заряды различных знаков, двигающиеся в жидкости вдоль электрического поля. На рис. 1.12,*а* приведена схема такого процесса для нарастающего магнитного поля, когда направление вектора магнитного поля совпадает с направлением вектора электрического поля. Видны дополнительный «импульс» тока и ускорение движения заряда. Если же этот «импульс» не совпадает с направлением движения заряда, то оно тормозится. На рис. 1.12,*б* приведена схема процесса для спадающего магнитного поля. В этом случае действие поля на движущиеся в жидкости заряды противоположно предыдущему случаю. Таким образом, в зависимости от того, под каким углом будут расположены векторы магнитного и электрического полей, будет либо тормозиться, либо ускоряться движение заряженных частиц. Определившиеся здесь силы торможения или ускорения зарядов могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на характер рассматриваемых процессов. Например, дополнительное ускорение, сообщенное электрону при сверхдлинном разряде, оказывает положительное влияние на прорастание стримера и осуществление разряда, но то же дополнительное ускорение, сообщенное электрону в импульсном конденсаторе, может вывести его из строя.

В импульсных электромагнитных полях можно наблюдать целый ряд явлений, когда различные частицы (коллоидные, органические клетки, бактерии, споры) под действием этих полей «выстраиваются» в длинные цепочки, располагающиеся вдоль силовых линий поля. В частности, именно это явление послужило основой разработанного еще в 1950 г. метода визуального наблюдения электромагнитных полей [7].

Сущность его сводится к тому, что нейтральные или ионизированные частицы, размещенные в жидкости определенным образом, позволяют визуально наблюдать свечение микроскопических разрядов, возникающих между ними, а также фиксировать для

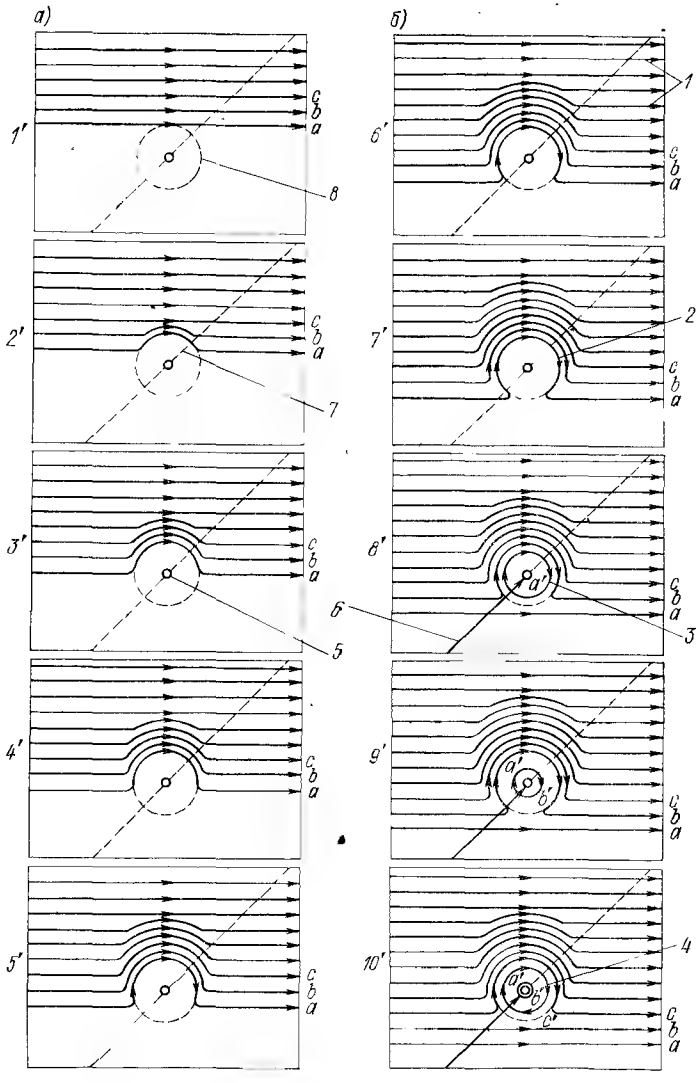


Рис. 1.12. Схема развития процесса расширяющихся (или стягивающихся) магнитных силовых линий и действия их на заряды различных знаков, двигающиеся в жидкости поперек магнитного поля вдоль силовых линий электрического поля, для нарастающего (*а*) и спадающего (*б*) магнитного поля (*a*, *b*, *c* — отдельные силовые линии; *1'—10'* — этапы развития процесса во времени): *1* — магнитные силовые линии; *2*, *3* - стягивающаяся силовая линия *a*, *4* — стягивающаяся силовая линия *b*, *5* — движущийся заряд, *6* — направление силы действия магнитного поля на движущийся заряд; *7* - направление движения заряда, *8* граница силового поля заряда

последующего изучения конфигурацию электрического поля. Достаточно яркое свечение этих разрядов позволяет не только визуально наблюдать их, но и фотографировать. Это достигается регистрацией разрядов на фотопластинке, помещенной в жидкость между электродами.

1.5. КПД электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект был предложен прежде всего как способ трансформации электрической энергии в механическую. В связи с этим КПД этого преобразования является определяющим фактором при решении вопросов практического использования электрогидравлических способов и устройств. КПД (η) электрогидравлического эффекта зависит как от параметров электрической схемы, так и от свойств подвергающихся электрогидравлической обработке объектов, среды, в которой она происходит, и характера обработки.

Ниже дается качественное изложение факторов, оказывающих влияние на величину КПД электрогидравлического эффекта

$$\eta = f(a,\ l,\ kp,\ \frac{1}{\tau},\ b),$$

где $a = f\left(C,\ U,\ \frac{1}{L},\ \frac{1}{R}\right)$ — амплитуда тока импульса; l — расстояние между электродами (длина искры); kp — коэффициент, характеризующий резонансные свойства материала; τ — длительность импульса; b — крутизна фронта импульса; C — электрическая емкость; U — номинальное напряжение; L — индуктивность разрядного контура; R — сопротивление разрядного контура.

Доказано, что КПД возрастает с увеличением значений a и b, а также длины искры l и уменьшается с увеличением τ. Уменьшение значений L и R разрядного контура, а также рост напряжения U и в известных пределах емкости C способствуют увеличению механического КПД электрогидравлического эффекта, увеличению КПД также способствует увеличение плотности рабочей жидкости [3].

Однако следует также иметь в виду сложный характер зависимости электрических параметров друг от друга. Так, при увеличении емкости контура линейно возрастают энергия импульса, амплитуда тока, удлиняется искра, но одновременно увеличивается и длительность импульса. Возрастание амплитуды тока и рост длины искры способствуют увеличению КПД, но их положительное влияние подавляется быстрым увеличением длительности импульса.

Поскольку передача энергии от искрового канала в окружающую его среду осуществляется через поверхность этого канала, то пространственные параметры искры будут в значительной степени определять эффективность этого процесса. Поэтому, говоря далее о напряжении и емкости, следует прежде всего иметь в виду,

что они являются главными факторами, определяющими длину (напряжение) и диаметр (емкость) искрового канала. При увеличении напряжения резко возрастают энергия импульса ($A = CU^2/2$) и крутизна фронта импульса тока [3, 4].

Кроме того, с повышением напряжения одновременно увеличивается и длина искры. Казалось бы, ясно, что увеличение длины и диаметра искрового канала, увеличивая его поверхность, будет способствовать улучшению условий перехода энергии в окружающую среду. Однако с ростом диаметра канала переход энергии из его центральных частей на периферию будет все более затрудняться и энергия начнет непроизводительно расходоваться на перегрев канала искры. Для ослабления этого отрицательного фактора можно увеличить крутизну фронта и уменьшить длительность импульса, так как увеличение скин-эффекта, возникающее при этом, вызовет интенсивное перекачивание энергии из центральных областей канала на его периферию, а увеличение крутизны фронта и уменьшение длительности импульса достигаются повышением напряжения.

В конечном счете повышение напряжения вызывает рост КПД и приводит к возрастанию «жесткости» электрогидравлического удара, делая его более коротким, — бризантным. Увеличение емкости, наоборот, приводит к «смягчению» электрогидравлического удара, делая его менее «жестким» — более длительным.

Увеличение индуктивности разрядного контура приводит к резкому возрастанию длительности импульса, что даже при постоянной амплитуде тока ведет к резкому изменению крутизны фронта, который становится более пологим, а поэтому даже ничтожное уменьшение индуктивности разрядного контура приводит к увеличению механического КПД разряда.

Увеличение сопротивления разрядного контура снижает энергию импульса и уменьшает амплитуду тока, вызывает увеличение длительности импульса и резко влияет на крутизну его фронта, делая его более пологим, что в конечном счете также приводит к снижению КПД. Таким образом, направленное изменение какого-либо параметра разрядного контура одновременно с этим разнообразно влияет и на остальные параметры разряда [6].

Разделив процесс на стадии, как это мы сделали раньше, проще и удобнее определить возможности повышения КПД для всего процесса в целом. При этом большое значение имеют как длительность, так и форма импульсов тока и напряжения каждой стадии.

Так, для повышения КПД выгодно, чтобы предразрядная стадия была возможно короче. Однако при обычных условиях уменьшение длительности этой стадии может привести к резкому уменьшению длины искрового разряда, поскольку за короткое время стримеры, если их росту чем-либо не помочь, не смогут прорасти на большое расстояние. Таким образом, укорочение длительности предразрядной стадии связано с необходимостью увеличения скорости роста стримеров или облегчения условий

их роста в жидкости. А скорость и условия роста стримеров зависят в большей степени от напряжения и в меньшей степени от характера и степени ионизации жидкости.

На стадии переднего фронта механический КПД разряда будет возрастать с увеличением крутизны фронта и амплитуды импульса тока. КПД также резко возрастает, если стадии, не участвующие в процессе трансформации электрической энергии (примерно с половины стадии заднего фронта вплоть до полного прекращения процесса разряда), упразднить вообще. Для некоторых видов электрогидравлической обработки эти стадии не нужны, на них происходит непроизводительный расход энергии (до 10 - 30 % всей энергии разряда). В связи с этим повышение электрического, а значит, и механического КПД за счет экономии этой энергии представляет большой практический интерес.

Разработанные электрические схемы позволяют «отсекать» любую из хвостовых частей импульса, оставляя при этом в конденсаторе всю ту энергию, которая ранее шла на обеспечение существования этих стадий. Сохраненная в конденсаторе энергия ускоряет зарядку конденсатора до заданного пробивного напряжения и этим на 10—20 % повышает КПД всех электрогидравлических устройств, работающих по таким схемам.

Однако в зависимости от поставленных целей (характера обработки) отношение к существованию различных стадий разряда во времени может быть и противоположным. Так, для осуществления, например, импульсного электролиза оказывается рациональным как можно более удлинить предразрядную стадию процесса. В тех случаях, когда необходимо использовать действие магнитного поля для активизации химических реакций, следует увеличить крутизну фронта и амплитуду тока на стадии переднего фронта, что выгодно также и при использовании в тех же целях процессов кавитации в кавитирующем кольце, тем более мощном, чем больше мгновенная мощность разряда.

1.6. Импульсная электрохимия

Объяснить все процессы, происходящие при воспроизведении электрогидравлического эффекта, невозможно, не объяснив химической основы этого явления. Действующие при этом внешние силы могут во много раз превосходить силы, рассматриваемые при обычных химических процессах, что не может не сказаться на характере протекания возникающих при этом химических реакций и их конечных результатах.

Химия жидких растворов в обычном ее представлении изучает взаимодействия атомов, ионов и молекул, совершающиеся под влиянием собственных сил притяжения и отталкивания, чему сравнительно слабые внешние силы могут в какой-то степени только способствовать, отнюдь их не определяя. Таким образом, это, по существу, химия слабых внешних воздействий.

Электрогидравлика использует токи в сотни тысяч и миллионы ампер, напряжения в сотни тысяч вольт, создающие огромной силы электрические и магнитные поля, но, что самое главное — она использует только импульсное приложение этих сил к обрабатываемым объектам. Этим объясняются очень резкие отличия процессов, происходящих при электрогидравлическом эффекте от процессов обычной химии.

Отсюда представляется возможной допустимость введения в практику нового раздела электрохимии для такого рода процессов, который можно назвать импульсной электрохимией.

Импульсная электрохимия должна исследовать химические процессы, совершающиеся в результате сильных внешних импульсных электрических воздействий.

В химических процессах, сопутствующих электрогидравлическому воздействию на материалы, такие факторы, как характер и длительность действующих сил, скорость взаимодействия и длина путей перемещения частиц, могут выступать как условия, определяющие форму и скорость протекания химических реакций. Эти факторы изменяются в зависимости от параметров электрогидравлического эффекта. Особенно отчетливо их влияние будет сказываться в начальной стадии основных этапов процесса.

Для всякого химического процесса существуют некоторые минимальные время и энергия, необходимые для осуществления данной химической реакции, которая иначе произойти не сможет, даже если и существуют все прочие необходимые условия ее возникновения. При электрогидравлическом воздействии на материалы длительность приложения действующих сил может оказаться настолько короткой, что какая либо химическая реакция может и не произойти. Это следует учитывать при обсуждении полученных результатов.

По нашим представлениям, в химических процессах при электрогидравлическом воздействии на материалы заметную роль (в том числе и как химический фактор) играют свободные электроны (тем более, что условия их возникновения и активного существования при этом более чем благоприятны). Это положение подтверждается многими наблюдениями и опытными данными. В частности, удалось наблюдать ряд явлений, которые могут быть определены и отчетливо объяснены только за счет существования в этих процессах подобных электронов. К ним относятся явления так называемого «лучистого разряда», которые возникают при работе на очень малых (менее 0,001 мкФ) емкостях и относительно высоких (более 100 кВ) напряжениях. При этом кроме обычных криволинейно ветвящихся стримеров, присутствующих теперь уже в меньших количествах и внешне имеющих «тонкие» концы и «толстые» основания ветвей, во все возрастающем по мере увеличения жесткости режима количестве наблюдаются и особые «лучистые» стримеры совершенно одинаковой «толщины» по всей своей длине и развивающиеся при этом иде-

ально прямолинейно. Длина лучей (при 100 кВ) может достигать 50—80 мм и более. Лучи белого цвета и более яркие, чем обычные стримеры, развиваются рядом с ними, толщина их исчезающе мала и оценить ее визуально практически невозможно. Сходство лучей с прямолинейными участками скользящих разрядов, развивающихся на тех же режимах, позволяет провести некоторую аналогию между ними.

По нашим представлениям, возникающие под влиянием сверхмощных полей лучистые стримеры образованы свободными электронами, движущимися с большими скоростями. Для них жидкость оказывается подобной вакууму, в силу чего пути их перемещения к электроду оказываются практически прямолинейными. Скользящие разряды [7] являются весьма перспективным средством исследования глубоких физико-химических свойств и молекулярной структуры поверхностных слоев жидкостей.

Опыт показал, что углы разветвлений таких скользящих разрядов (например, на поверхности воды) с достаточной точностью совпадают с углами между осями, соединяющими центры атомов в молекуле воды, или углами, образованными молекулами воды, плотно уложенными в «поля» плоских кристаллов воды, плавающих в ее поверхностном слое. Опыт не обнаружил углов разветвлений разрядов, которые бы резко выходили за пределы указанных выше «стандартов». Точность совпадений возрастает с увеличением жесткости режима работы.

Отмеченное нами явление «поворота» разрядов, становившихся после изменения направления то широкими, идущими как плоская лента, то узкими, словно та же лента, но поставленная «на ребро», также находит объяснение. Очевидно, что диполи, стоящие «торчком» в поверхностном слое жидкости, позволяют разряду либо скользить, как плоская лента, по их верхушкам, и тогда разряд действительно имеет вид широкой плоской ленты, либо проникать, как лезвие бритвы, между их верхушками в глубь поверхностного слоя диполей, таким образом частично углубляясь в этот поверхностный слой, и тогда разряд действительно имеет вид плоской ленты, но поставленной на ребро.

Высказанные положения подтверждаются тем, что в случае использования иных, чем вода, жидкостей наблюдается большое многообразие форм скользящих разрядов. Естественно, что при этом должны быть приняты все необходимые меры против поглощения исследуемой в опыте жидкостью паров воды из окружающей атмосферы. Обнаруженное при работе на этих же электрических параметрах явление закручивания «в кольцо» скользящих разрядов, развивающихся с острия отрицательного электрода, объясняется влиянием на электронно-ионные процессы таких разрядов их собственных электромагнитных полей. Электромагнитные силы разряда разделяются на чисто электрические и чисто магнитные со свойственной каждой из них спецификой воздействия на строго определенные стороны протекающих процессов.

Так, электрические силы действуют на ионы в жидкости, сообщая им движение к противоположно заряженным электродам, тем самым определяя само явление импульсного электролиза. Эти же силы действуют на неполярные молекулы и атомы, растягивая их в диполи, а при достаточно мощных воздействиях даже разрывают их на ионы. Они же при определенных условиях оказываются способными вырвать гидратированный ион из окружающей его «шубы» диполей, сообщив ему при этом скорость, значительно превышающую обычную. Аналогично действуют они и на упомянутый выше гидратированный электрон, не только определяя его существование, но и заставляя двигаться между частицами жидкости, как в вакууме, с высокими скоростями.

Магнитные силы определяют общее число ионов и диполей, участвующих во взаимном противоположно направленном их перемещении, и определяют характер этого движения в перпендикулярном к нему направлении, либо стягивая, либо, наоборот, раздувая движущиеся потоки зарядов.

Отсюда напрашивается естественный вывод о том, что если магнитное поле изменяет концентрацию ионов, а следовательно, и свободных радикалов в том или ином объеме сосуда, то тем самым оно уже превращается в очевидный и достаточно активный фактор химического воздействия.

Поскольку импульс тока и импульс напряжения прикладываются к жидкости разновременно и резко различаются по характеру своего воздействия на жидкость и поскольку крутизна их нарастания и спада, а также длительность при этом могут изменяться в широких пределах, то в каждый из моментов рассматриваемого нами химического процесса мы по существу имеем дело с жидкостями, совершенно различными не только по своим физико-химическим свойствам, но и по своей способности к реакции.

Высказанное положение является основным положением, определяющим методологический подход к рассмотрению всех процессов импульсной электрохимии электрогидравлического эффекта, затронутых в данной работе. Импульсная электрохимия электрогидравлического эффекта — это прежде всего импульсная электрохимия воды или водных растворов веществ. Для практически нерастворимых или не смешивающихся с водой жидкостей наличие в них хотя бы следов воды определяет не только интенсивность и характер возникающих при этом химических реакций, но и самую возможность их существования. В опыте зачастую оказывается вполне достаточным наличие в данной жидкости только естественно растворенных в ней паров воды, чтобы необходимые нам химические реакции существовали и проходили достаточно полно и интенсивно.

Однако химические реакции под воздействием электрогидравлического эффекта могут протекать и во всех других жидкостях, в том числе и в неводных растворах, а также в полностью обезвоженных жидкостях при условии, если в них под влиянием

диссоциации, электромагнитных полей и других естественных причин либо под воздействием предварительной электрогидравлической обработки уже существуют или временно возникают ионы или свободные радикалы. Начальным этапом таких процессов может стать, например, возникновение или предварительное существование диполей.

Установлено, например, что при резонансном разрушении материала большое значение в повышении его эффективности имеют внутренние перенапряжения в дислокациях кристаллов, и особенно те из них, которые способствуют силам резонансного разрушения. Не будет преувеличением допустить существование и чисто резонансного разрушения химических связей, поскольку частоты и амплитуды жестких режимов электрогидравлического эффекта принципиально способны сообщать интенсивные колебания даже отдельным молекулам. В этом случае внутренние напряжения могут и будут способствовать разрушению химических связей.

На основании наблюдений можно предположить, что подобного рода процессы при электрогидравлическом воздействии действительно происходят, в частности, разрушение диполей на ионы, разрушение крупных молекул полимеров и т. д.

Необходимо отметить, что все химические элементы, участвующие в реакциях, находятся в жидкости не только в виде простых молекул (анионов и катионов) или свободных радикалов, но и в виде ионов сложных комплексных молекул и даже коллоидов. При работе с какой-либо жидкостью исследователь на каждой из стадий будет иметь дело с совершенно различными жидкостями. Отсюда понятно то естественное недоумение многих, когда в своих работах при исследовании процесса в целом они получали либо огромные разбросы численных значений результатов, либо данные, прямо противоположные данным своих предыдущих опытов.

Нами разработаны методы, позволяющие во многих случаях в значительной мере выделять факторы, действующие в каждой из указанных выше стадий, регистрируя результаты химических процессов, протекающих на отдельных этапах каждой стадии, в зависимости от строго определенных действующих факторов.

Рассмотрим действующие факторы по каждой из стадий общего процесса электрогидравлического эффекта.

За время *предразрядной стадии* на первый план по своему значению выступают химические процессы, определяемые импульсным электролизом. Характерными для этой стадии являются, во-первых, резко выраженная асимметричность распределения и концентрации ионов различной полярности в объеме жидкости между электродами и особенно вблизи них, определяемая резкой асимметрией электромагнитного поля, во-вторых, преобладание в некоторых точках объема жидкости (определяемых формой полюсов и их взаимным расположением) ионов одного знака.

Основным результатом импульсного электролиза на этой стадии процесса является образование «газовой рубашки», окружаю-

щей канал стримера и создающей электрическую и тепловую изоляцию его. В дальнейшем эта газовая рубашка служит главной основой того парогазового демпфера, который снижает механический КПД электрогидравлического эффекта, оказывая таким образом на разных этапах процесса то положительное, то отрицательное влияние.

Следует указать, что химические процессы на этой стадии определяют показатель «добротности» данной жидкости как импульсного диэлектрика (см. гл. 2), а также время, в течение которого эта жидкость может работать как импульсный диэлектрик в разного рода импульсных конденсаторах, выпрямителях, кабелях. По нашим представлениям, именно на этой стадии наиболее отчетливо проявляет свое действие и свободный гидратированный электрон.

Основным действующим фактором химического воздействия на предразрядной стадии процесса разряда являются сверхмощные электрические поля, способные растягивать и превращать в диполи все неполярные молекулы, а некоторые из полярных молекул даже разрывать на ионы. При этом импульсный электролиз в отличие от обычного (захватывающего весь объем жидкости) протекает очень неравномерно (по объему) и наиболее интенсивно проявляется непосредственно у электродов, на передней поверхности которых образуются импульсные мономолекулярные газовые пленки от разрядившихся ионов, и столь же интенсивно в объеме жидкости между электродами (в основном на поверхности «выдвижного электрода», чем по сути дела является в этот период растущий в жидкости стример).

Многие процессы, происходящие при этом, можно наблюдать визуально. Так, при некотором навыке наблюдают яркое розовато-оранжевое свечение (под влиянием собственных полей разряда) газовых вакуолей, возникающих при стягивании в пузырьки цилиндрических газовых рубашек, которые образуются на исчезающих ветвях стримеров в результате разряда ионов на этот стример, как на электрод за время его роста в жидкости.

Химические процессы на *стадии переднего фронта* характеризуются резким спадом интенсивности импульсного электролиза, который по-прежнему протекает в основном на поверхности электродов и в объеме жидкости между ними, развиваясь между ионами, деформированными импульсными полями.

Определяющим условием существования высокого показателя «добротности» данной жидкости как импульсного диэлектрика на этой и предыдущей стадиях процесса будет монотонность нарастания (или спада) крутизны фронта импульсов тока и напряжения, постоянство ускорения этого нарастания.

Химические процессы на *стадии заднего фронта* по сути дела аналогичны процессам на предыдущей стадии с той разницей, что если электромагнитные силы в первом случае с каким-то ускорением нарастали (например, магнитное поле) или убывали (элект

рическое поле), то на данной стадии процесса они с несколько иными ускорениями будут соответственно либо убывать (магнитное поле), либо нарастать (электрическое поле). Напряжение при этом переходит через нулевое значение, изменяет знак и нарастает.

Стабильность деформации собственных силовых полей сталкивающихся ионов, движущихся навстречу друг другу, определяет их способность к электролизу. Чем монотоннее и ближе к прямой идет нарастание (или убывание) крутизны фронта импульса напряжения (и в значительно меньшей степени импульса тока), тем более стабильной будет эта деформация, «неподвижнее» движущиеся ионы, менее электропроводной данная жидкость и тем лучшим импульсным диэлектриком она будет.

Исследование процессов, протекающих за время существования стадии заднего фронта, показывает, что, хотя сама стадия и не вносит в общий процесс какого-либо существенного «химического» вклада, но большинство процессов, являющихся результатом механических, физических и химических действий электрогидравлического эффекта, тем не менее происходят за время существования данной стадии (например, процессы газового разряда).

Химические процессы на *стадии последующих полуволн* будут аналогичны процессам, происходящим на двух предыдущих стадиях. Однако длительность и крутизна фронтов каждой полуволны, амплитуды и меняющиеся знаки напряжений и токов этих полуволн, быстро убывая, будут этим резко отличаться от соответствующих характеристик предыдущих стадий.

В большинстве случаев, даже на пограничных со средними (жестких) режимах, токи полуволн этой стадии могут проходить уже не только через узкий плазменный шнур, заполняющий канал разряда в плотно обжимающей его жидкости, но и непосредственно через парогазоплазменную смесь, заполняющую начавшую свое образование в жидкости и уже отчетливо выраженную полость. Аналогичные соображения относятся и к работе на мягких режимах, где токи полуволн должны вызывать все явления и следствия, проистекающие при обычном разряде в газах.

Однако, если режим выбран правильно и все определяющие его параметры не искажены, то форма импульса тока в разряде даже на очень мягких режимах будет всегда близка к апериодической и, таким образом, к моменту вступления разряда в стадию последующих полуволн энергия разряда за две основные, определяющие, стадии (переднего и заднего фронтов) окажется уже израсходованной. Поэтому на развитие мощного разряда в парогазовой полости оставшейся в контуре энергии окажется недостаточно и такого разряда практически не произойдет. Поскольку время существования полости для всех режимов сравнительно велико (в среднем на 2—4 порядка больше времени существования разряда), становится очевидным, что для каждого режима суще

ствует такая максимальная частота, выше которой работа любой электрогидравлической установки становится практически невозможной. За пределами этих частот разряды начинают возникать в еще не исчезнувшей до конца полости, не создавая при этом ни трансформации энергии, ни сверхвысоких давлений, ничего того, что мы называем электрогидравлическим эффектом.

Это еще раз говорит о важности работы электрогидравлических установок только на оптимальном режиме, когда при любых параметрах импульса количество пара и газа в полости минимально, в силу чего полость захлопывается, практически не совершая пульсаций.

Естественно, что при работе на схемах, «отсекающих» практически бесполезные стадии импульса, образующаяся полость будет содержать минимум газов и паров. Расширение даже очень крупной полости (например, до 0,5 м в диаметре) совершается за тысячные или сотые доли секунды, поэтому быстрое расширение газов и паров (пусть и в очень малом количестве, но заполняющих полость) вызывает резкое (пропорциональное скорости расширения) понижение температуры в ней. Это будет способствовать ускорению конденсации и растворению этих паров и газов. Предельные частоты (на оптимальных режимах работы) выше на жестких и ниже на мягких режимах, колеблются (в зависимости от энергии разряда) от нескольких тысяч до 10—20 Гц.

Очевидно, что высокий механический КПД не всегда совпадает с высоким химическим КПД, который для каждого типа реакций будет различным. Поэтому в области химической технологии будет естественнее стремиться к увеличению выхода данного химического продукта или повышению его качества, а не к достижению высокого механического КПД. Вполне возможно в этом случае работать либо на кистевом разряде, либо только на колебательной, а не на апериодической форме импульса.

Химические процессы на *стадии затухания реакций* наиболее сложны. Разнообразные, иногда очень неустойчивые химические соединения, возникшие за все предыдущие стадии общего процесса разряда, вступают в этот период в химическое взаимодействие, превращаясь при этом во все более и более стабильные соединения. Стадия характеризуется большой длительностью протекания и может растягиваться иногда до нескольких часов, дней или даже месяцев.

При электрогидравлической обработке обычной воды химические соединения, возникающие и существующие в ней к началу данной стадии, могут быть весьма многообразными — это и многовалентные ионы различных примесей и свободные радикалы, ионы NO, NO_2 и NO_3, перекись водорода, атомарные кислород и водород, цианиды и даже некоторые простейшие аминокислоты. Естественно, что с изменением и усложнением состава жидкости соответственно будут возрастать многообразие и сложность возникающих и образующихся химических веществ. Химические соедине-

ния, возникающие на первой стадии, а равно и во все последующие стадии общего процесса, в течение последующих стадий будут подвергаться всем специфическим воздействиям, свойственным этим стадиям, и под их влиянием будут изменяться и дальше. Таким образом, конечный продукт будет результатом многих последовательных химических превращений.

Химические процессы, протекающие при электрогидравлическом воздействии на жидкость (воду), внешне носят, как правило, одновременно и окислительный и восстановительный характер. Однако в зависимости от размещения и конфигурации электродов (и соответственно степени однородности электромагнитного поля) может быть достигнуто преобладание в одном месте только окислительных, а в другом (даже рядом расположенном) — только восстановительных процессов. Это позволяет утверждать, что при электрогидравлическом воздействии на жидкость (в данном случае на воду) может иметь место неравномерное распределение в жидкости действующих химически активных факторов, обусловленное неоднородностью электромагнитного поля и спецификой его приложения к жидкости. Поэтому каждая отдельная стадия общего процесса может характеризоваться преобладанием в ней окислительных либо восстановительных процессов.

Опытным путем можно (например, для воды) установить, что при работе на так называемой прямой полярности (минимальном — положительном и максимальном — отрицательном электродах) процесс в объеме между электродами, как правило, будет характеризоваться преобладанием окислительных, а при работе на обратной полярности (минимальном — отрицательном и максимальном — положительном электродах) — восстановительных реакций. По мере того как в соответствии с протекающей в данный момент стадией разряда напряжение и ток будут менять свои знаки, вблизи полюсов будет происходить одновременная смена окислительных реакций на реакции восстановительные, и наоборот.

Используя специальные приемы, можно с достаточной точностью исследовать химические процессы, протекающие как вблизи электродов, так и в любой части объема жидкости (например, при помощи полного или частичного заполнения ванны с расположенными в ней электродами каким-либо специальным гелем). Вводя в состав этого геля специально подобранные индикаторы, легко установить присутствие и даже количество в заданной точке объема ванны любого из интересующих нас ионов. Для удобства объем ванны разделяют продольными или поперечными (пористыми) перегородками на любые по величине, легко отделяемые друг от друга объемы, заполненные гелем. Таким образом, химический анализ в данной точке объема ванны может быть осуществлен одновременно и сразу после прохождения через ванну каждого единичного импульса, как сопровождающегося, так и не сопровождающегося искровым разрядом.

Последний случай представляет интерес, поскольку, как показал опыт, кистевые разряды, осуществляемые в разного рода жидкостях, оказывают на них несколько специфическое химическое воздействие (по интенсивности сравнимое с искровым разрядом). Опытные данные позволяют утверждать, что кистевой разряд в жидкости при достаточно энергичном его освоении может в самое ближайшее время стать мощным технологическим инструментом для использования в химической промышленности.

При изучении явлений импульсной электрохимии может быть использован прием размещения электродов в отдельных сосудах, полностью или частично заполненных специально подобранными гелями, электрически соединенных между собой либо обычными, либо гелевыми, либо жидкостными проводниками, представляющими собой стеклянные трубки или капилляры, заполненные гелем или жидкостью. Форму сосудов, расположение в них электродов, а также точки соединения сосудов обычными или гелевыми проводниками можно произвольно изменять в зависимости от цели эксперимента.

Особый интерес представляет вариант использования этого метода, когда два сосуда с размещенными в них электродами соединяют между собой десятками прямолинейных или изогнутых трубок (или капилляров), заполненных подобранными жидкостями или гелями. При этом в каждом из сосудов с электродами могут быть помещены совершенно различные жидкость или гель. Этот вариант отличается быстротой и удобством исследования различных гелей или жидкостей, заполняющих трубки.

Во всех случаях применения жидких электролитов, заполняющих отсеки ванн или соединяющие их трубки, среду можно выполнять и проточной. Такой вариант применения метода позволит легко выводить образовавшиеся химические соединения по мере их получения, либо вводить в реакцию необходимые химические реагенты.

Индикаторы, вводимые в гель, в зависимости от их свойств будут реагировать на любой подлежащий изучению ион (например, изменением цвета, прозрачности геля и т. п.). Присутствие исследуемых ионов в каждом объеме может быть определено и последующим химическим анализом пробы. В качестве такого рода индикаторов могут быть использованы разного рода флюоресцирующие, фосфоресцирующие или даже опалесцирующие вещества. Регистрация химических изменений в гелевой ванне может производиться после прохождения через нее как одного, так и нескольких импульсов. Однако особый интерес вызывает возможность регистрации химических изменений после прохождения не всего импульса, а только какой-либо одной его части.

В этих целях обычными методами электроники часть импульса, химическое воздействие которого подлежит изучению, «отсекается» от остальной («мешающей») части и направляется в ванну. Наиболее легко осуществить последовательное «отсечение» только

«передних» или, наоборот, только «задних» хвостовых частей импульса.

Так, отсекая все последующие стадии, можно исследовать химическое воздействие только одной предразрядной стадии или только предразрядной стадии и стадии переднего фронта и т. д. Отсюда кажется логичным, отсекая этим же методом все предыдущие стадии, изучить химическое воздействие, например, одной стадии затухания реакций или (одновременно с ней) стадии последующих полуволн и т. д. Принципиально не встречает затруднений «отсечение» всех стадий как предшествующих любой изучаемой стадии, так и последующих. Однако следует иметь в виду, что процесс разряда как таковой перестает существовать и исчезает как целое, если будет осуществлено «отсечение» хотя бы одной первой стадии его (если стримеры не прорастут, то между электродами не будет ни искрового, ни кистевого разряда). В этом случае выход состоит в периодическом подключении вместе с возникновением очередной стадии разряда новых, еще «не работавших» на предыдущих стадиях объемов ванны или трубок-капилляров. Выполнить подобную задачу нетрудно. Для этого необходимо, чтобы поочередно отсекались только последующие стадии, т. е. чтобы сначала изучалось химическое воздействие только одной предразрядной стадии, затем совместное химическое воздействие предразрядной стадии и стадии переднего фронта, потом совместное воздействие их обеих и стадии заднего фронта и т. д. Дополнительные химические изменения будут определяться каждой последующей стадией.

Гарантированная полная стабильность всех характеристик разряда при его многократном повторении позволит (применяя изложенную выше методику) получить исчерпывающую картину химических реакций, протекающих на каждой стадии разряда при всем многообразии возможных параметров разрядного контура, режимов работы, свойств и состава жидкостей, формы, размеров, размещения и материалов электрода, экранов и т. д.

Исследования показали, что материал электродов в обычных условиях незначительно влияет на процесс развития и протекания разряда, но очень заметно влияет на химические процессы, возникающие при разряде. Так, химические процессы, протекающие с применением одного или обоих угольных электродов, несколько отличаются от явлений, протекающих, например, при использовании медных или алюминиевых электродов. При работе по излагаемой методике следует иметь в виду, что использование гелей определяющим образом сказывается на всем поведении ионов, и прежде всего на уменьшении их скорости.

Так, расположив подлежащий исследованию гель тонким слоем на какой-либо изолирующей поверхности и подсоединив к нему электроды, можно с большой точностью определить скорость движения в нем любого из интересующих нас ионов, при условии если он окрашивает индикатор или каким-либо иным способом

проявляет свое присутствие в геле. В частности, движение одного из ионов в слое геля, изготовленного растворением желатины в воде, проявляется в том, что по поверхности желатины от одного электрода к другому со скоростью движения иона распространяется отчетливо видимая, расположенная концентрично электроду кольцевая «волна» в виде резко выступающего возвышения на тонком слое геля, увеличившегося в объеме под влиянием движущегося в нем иона. Скорость распространения подобной «волны», изменение цвета или прозрачности (по Теплеру) могут быть измерены обычными средствами.

Отметим, что уникальные возможности химического воздействия электрогидравлического эффекта на обрабатываемые материалы, несомненно, обеспечат его широкое использование в самых различных химических процессах.

Глава 2

Методы обеспечения практического использования электрогидравлического эффекта

2.1. Сверхдлинный разряд

Основой, обеспечивающей многообразные технологические возможности электрогидравлического эффекта, является предложенный в 1950 г. способ получения сверхдлинных разрядов в проводящих жидкостях, осуществляемый путем предельного уменьшения активной (т. е. соприкасающейся с жидкостью) площади положительного электрода при одновременном увеличении активной площади отрицательного электрода [4, 7]. Способ позволяет получать в проводящих жидкостях прорастание стримеров на значительные расстояния, в силу чего возникают разряды с большой длиной и поверхностью канала, способной интенсивно отдавать свою энергию в окружающее пространство. К выводу о возможности получения таких разрядов автор первоначально пришел в результате логических рассуждений.

Усилить эффект гидравлического удара можно, лишь создав все условия для максимально эффективного преобразования электрической энергии в механическую, имея в виду, что искра есть то орудие, которое передает энергию в окружающую жидкость. А поскольку энергия передается жидкости через поверхность канала искрового разряда, то очевидно, что энергия будет тем больше, чем больше будет поверхность. Наиболее существенным при решении этой задачи оказалось то, что искровой разряд развивается в жидкости, а именно в воде, и то, что химические процессы, возникающие при этом, являются фактором, определяющим характер всего процесса преобразования энергии. Оказалось также, что при этом весьма существенную роль играет закон Кольрауша, или закон аддитивности электропроводности различных ионов в растворах.

В воде, где практически существуют только два вида ионов: положительные H^+ и отрицательные OH^-, основная, определяющая весь процесс разряда роль принадлежит иону OH^-. В самом деле, электроны, срывающиеся с ионов OH^- и вливающиеся затем в канал стримера, определяют не только самое его существование, но и его длину, ибо чем их будет больше, тем дальше прорастет стример, тем длиннее будет разряд, меньше потери

на электропроводность и выше механический КПД разряда. В то же время ион H^+ (или гидроксоний H_3O^+) не принимает участия в росте стримеров и с этой точки зрения бесполезен для всего процесса разряда.

Таким образом, задача состояла в том, чтобы создать противоположные для ионов разных знаков условия: всемерно затруднять условия образования новых ионов H^+, и одновременно с этим всячески облегчать условия их разрядки; возможно более облегчать условия образования новых ионов OH^- с одновременным обеспечением их преимущественной разрядки не на электрод, а на растущий стример с тем, чтобы всячески стимулировать этим его рост в длину.

Создать такие условия оказалось возможным без сложных и дорогостоящих устройств и изменения химического состава воды благодаря изменению формы электродов.

Действительно, при резком уменьшении активной, соприкасающейся с водой поверхности положительного электрода (путем максимальной его изоляции по всей длине, кроме переднего конца) и одновременном резком увеличении активной поверхности отрицательного электрода в воде между электродами возникает значительная асимметрия поля и, как следствие этого,— особая ионная атмосфера (преимущественно одного знака), способствующая интенсивному прорастанию стримера в жидкости.

Такая асимметрия поля создает в области между электродами благоприятные условия для быстрой нейтрализации ионов H^+ и обогащения жидкости ионами OH^-. Ионы H^+ легко разряжаются на обширный отрицательный электрод, тогда как образование новых ионов H^+ при минимальной поверхности положительного электрода очень затруднено. В результате происходит резкое уменьшение общего числа ионов H^+ в объеме между электродами. Реакция жидкости в этом объеме становится щелочной. В то же время ионы OH^-, легко получая новые заряды от обширного отрицательного электрода, насыщают межэлектродное пространство и активно разряжаются, но не на сам, почти весь изолированный положительный электрод, а преимущественно на растущий от положительного электрода стример. Между электродами возникает отрицательный объемный заряд из ионов OH^-, легко отдающий свои электроны в растущий канал стримера, вследствие чего он и прорастает на значительные расстояния, определяя сверхдлинный канал искрового разряда при данных параметрах импульса.

Количественный сдвиг ионного равновесия в сторону преобладания ионов OH^- допустим действием закона Кольрауша, тем более, что этот закон справедлив не только для межэлектродного промежутка, но и в остальном объеме жидкости, где заряд ионов преимущественно противоположен (H^+).

Особая роль иона OH^- и ионов вообще и определяет тот факт, что в жидкостях со слабой ионной проводимостью (типа воды) за

счет ионов OH^- сверхдлинные разряды возникают легко и поэтому коэффициент преобразования энергии в них особенно высок. Таким образом, резкая асимметрия поля, возникающая при реализации описанного способа получения сверхдлинных разрядов, есть необходимое условие, обеспечивающее более высокий механический КПД и тем самым определяющее смысл электрогидравлического преобразования энергии.

С применением данного способа разряды в проводящей жидкости типа воды становятся при равных параметрах импульса в десятки раз длиннее и осуществляются при напряжении в 100 кВ с градиентом около 1 кВ/см длины рабочего искрового промежутка. С повышением напряжения градиент нелинейно падает, что позволяет при напряжениях в несколько сотен киловольт получать в воде многометровые разряды.

Таким образом, простое уменьшение активной поверхности положительного электрода с одновременным резким увеличением активной поверхности отрицательного электрода позволило полностью решить все поставленные задачи, в результате чего обычный, наблюдавшийся Т. Лейном, Д. Пристли, Ф. Фрюнгелем и другими исследователями маленький и слабый искровой разряд в воде превратился в сверхдлинный искровой разряд, способный легко передавать энергию наружу, обеспечивая этим высокий механический КПД нового способа промышленной трансформации электрической энергии в механическую [14, 19].

Существенный интерес представляет рассмотрение условий движения ионов в непосредственной близости от острия изолированного положительного электрода различных электрогидравлических устройств. На рис. 2.1,*а* показана конфигурация электрического поля в момент подачи импульса на электроды, а на рис. 2.1,*б* — в момент уже проросшего стримера. Из анализа динамики развития процесса следует, что в начальный момент около острия электрода образуется область высокой напряженности поля ($E \approx 36$ кВ см), в силу чего происходят вытеснение из этой области положительных ионов H^+ и обогащение ее объема отрицательными ионами OH^-. В указанной области возникает значительный объемный заряд противоположного электроду знака, что в высшей степени облегчает возникновение, а главное, быстрое прорастание мощных стримеров и, как следствие, «замыкание» электродов.

Из рассмотрения рис. 2.1,*а*, *б* также можно заключить, что по мере роста стримера область высокой напряженности оказывается связанной с его передним концом, т. е. перемещается вместе с ним. Стример выступает здесь как своеобразный «выдвижной электрод», площадь которого возрастает по мере его удаления от конца положительного электрода, что должно увеличивать и величину возникающих потерь. Однако конфигурация поля вокруг поверхности стримера по всей его длине оказывается крайне благоприятной для возникновения и существования окру

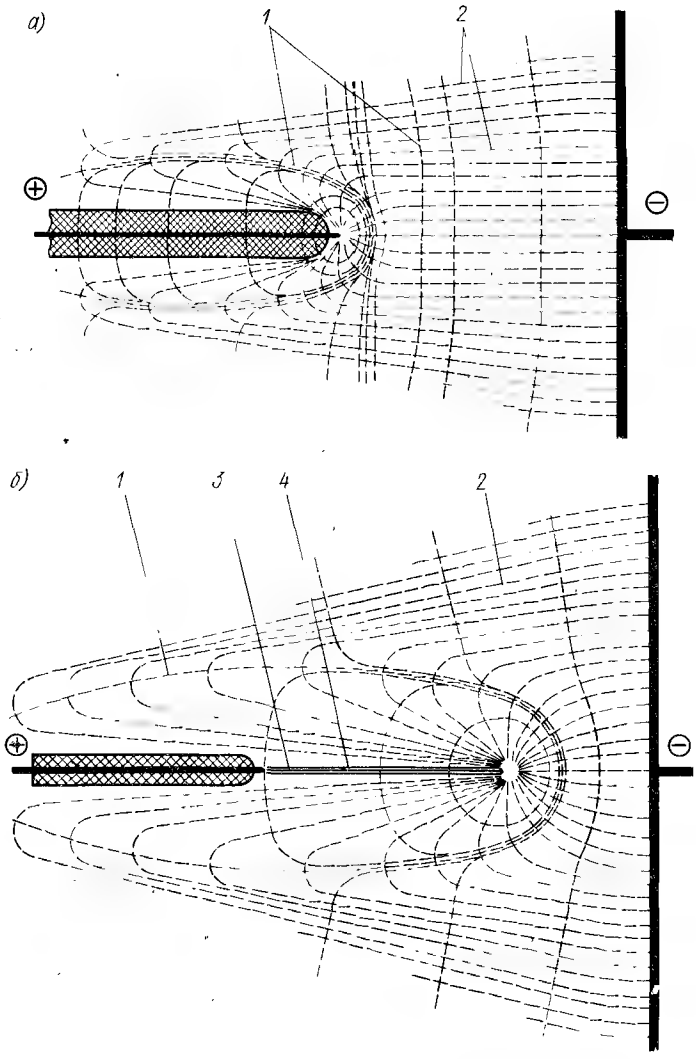


Рис. 2.1. Схемы электрического поля в жидкости: *а* — при подаче импульса на электроды; *б* — при прорастании стримера; *1* — эквипотенциальные поверхности поля, *2* — силовые линии поля; *3* — стример; *4* — оболочка канала стримера

жающего его «облака» отрицательных ионов OH^-, а значит, и газовой оболочки от разрядившихся ионов, надежно изолирующей канал стримера от непроизводительных потерь. Стример, почти проросший до второго электрода, даже в момент замыкания им обоих электродов по-прежнему имеет максимальную напряженность поля на своем переднем конце. И здесь поле вдоль стримера также равномерно и также способствует существованию облака

отрицательных ионов OH^-. Из сопоставления этапов развития поля следует, что по мере роста стримера область, занятая отрицательным объемным зарядом, как бы расплывается вдоль всей поверхности стримера, имея максимум концентрации на его переднем конце.

По мере роста стримера рост усов стримера назад и в направлении, перпендикулярном к оси основного канала стримера, затрудняется. Именно на этом основана предложенная конструкция электрода с выдвижным от торца изоляции острием стержня. При этом торец изоляции удаляется из области высоких напряженностей поля, что делает его наименее уязвимым для разрушения стримерами.

На приведенных схемах показан случай, когда стример имеет только один канал, без ветвей, развивающийся прямолинейно вдоль продолжения оси электрода, что на практике случается редко. Как правило, стример, даже одноканальный, имеет практически много небольших усов — ветвей, отходящих в стороны от главного канала вдоль силовых линий поля. Главный канал стримера, как правило, также не прямолинеен. В подобном случае конфигурация линий поля, конечно, будет сильно искажена взаимным влиянием полей усов, кривизной ветвей и главного канала, но принципиальная картина поля будет совершенно аналогична приведенной.

Зная конфигурацию поля в каждый из моментов роста стримера, можно представить и поведение ионов. На рис. 2.2 схематично показано поведение ионов вблизи острия положительного электрода. Отрицательные ионы OH^- отдают свои электроны в канал стримера, определяя этим его постепенное удлинение — «прорастание» в объем жидкости между электродами. При движении в канал эти электроны следуют по силовым линиям поля. Положительные ионы H^+ выталкиваются из зоны концентрации ионов OH^- действием сил поля, при этом их движение совершается также по силовым линиям поля. Это имеет существенное значение для объяснения еще одного явления — так называемого «ионного противопотока». Кроме того, подобное представление о характере их перемещения служит еще одним подтверждением положения о самоперемещающейся газово-ионной «самоизоляции» стримера при его росте и развитии в жидкости.

В самом деле, если картина движения ионов по схеме на рис. 2.2 сохраняется в основном до полного замыкания стримером обоих электродов, то, следовательно, истинная конфигурация поля в этот момент в точности совпадает с той, которая была приведена на рис. 2.1, *б*. Тогда многие ионы H^+, двигаясь ко второму электроду только по силовым линиям поля (вдоль них), будут вынуждены двигаться в совершенно, казалось бы, противоположном направлении — вдоль канала стримера, образуя в непосредственной близости от него окружающий его поток положительных ионов H^+, направленный к положительному электроду.

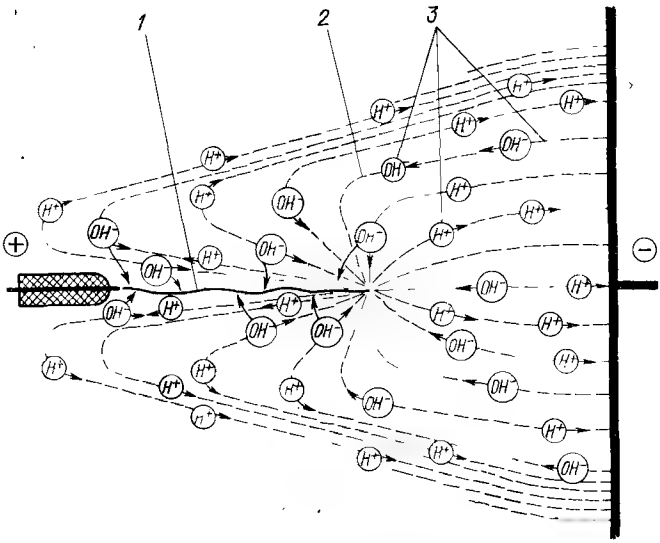


Рис. 2.2. Схема движения ионов в межэлектродном промежутке:
1 растущий стример, *2* – силовые линии поля; *3* направление движения ионов

Опыт показывает, что такого рода поток действительно существует. Для обнаружения его достаточно на пути стримера в жидкости поставить лист бумаги и пробить ее стримером или разрядом. При этом края образовавшегося отверстия оказываются вывернутыми в сторону, обратную направлению кажущегося движения стримера, т. е. они выворачиваются в ту сторону, в которую двигались электроны в канале — в сторону положительного электрода.

Согласно нашим представлениям о происходящем процессе, это сделали не электроны. Края бумаги были загнуты в эту сторону потоком положительных ионов, как рубашкой окружавших область повышенной концентрации отрицательных ионов и вывернувших края бумаги, которые продолжали движение по инерции уже после того, как разряд пробил бумагу и прекратился. Таким образом, около выступающего из изоляции острия положительного электрода при импульсном наложении поля создаются условия, когда тяжелые малоподвижные ионы OH^-, мешая друг другу разрядиться на острие положительного электрода, получат лучшие условия для этого, разряжаясь на быстро растущий стример. Быстрые, легкоподвижные ионы H^+, интенсивно выталкиваясь из зоны, окружающей острие электрода, тем самым создают около него зону повышенной концентрации отрицательных ионов — зону повышенной щелочности, зону окислительных реакций. По мере перемещения к отрицательному электроду концентрация

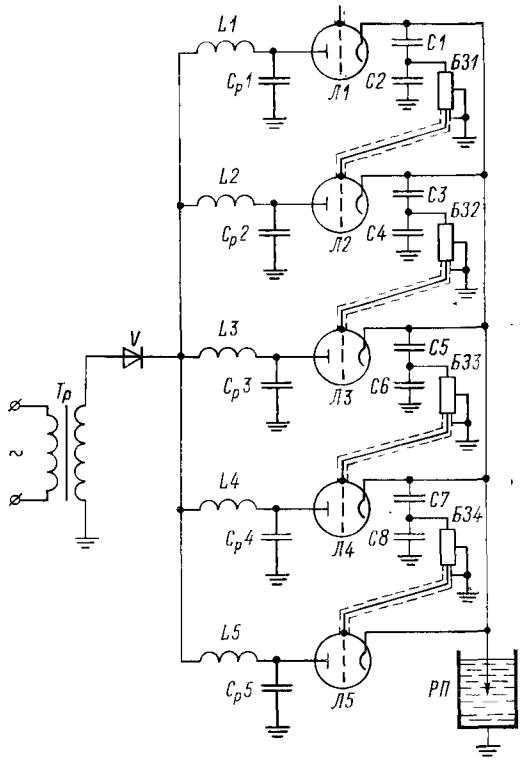


Рис. 2.3. Электрическая схема устройства для подпитки энергией растущих стримеров (*L1—L5* – разделительные индуктивности; *Ср1—Ср5* – рабочие емкости (конденсаторы); *Л1—Л5* — тиратроны; *С1—С8* — емкостные делители напряжения; *Б31—Б34* — регулируемые блоки запаздывания, *РП* — рабочий искровой промежуток в жидкости)

ионов OH^- уменьшается, оставаясь все же зависящей от напряженности поля. Все эти явления протекают за время предразрядной стадии общего процесса.

Существенно дополнили возможности способа получения сверхдлинных разрядов предложенные методы роста стримеров. Были найдены условия, при которых, располагая по существу любой, но достаточной для начала роста стримеров напряженностью поля, можно получать прорастание стримеров на заданные расстояния (рис. 2.3). Поскольку рост стримеров обеспечивается прежде всего наличием необходимой для начала этого процесса напряженностью поля и с падением ее ниже этого предела практически прекращается, то, осуществляя периодическую подпитку растущего стримера дополнительной энергией, оказалось возможным обеспечить его рост практически на любые расстояния. Для осуществления подобной подпитки необходимо в строго определенные ходом разряда промежутки времени подавать на стример дополнительное напряжение (например, подключая к нему новую, еще не израсходованную емкость, заряженную, как минимум, до того же напряжения, которое питало стример). Таким образом, осуществляемое автоматически электронной схемой подключение позволяет периодически вводить в канал растущего стримера дополнительную энергию, обеспечивая этим дальнейший непрерывный рост стримера [3].

Весьма перспективным методом повышения эффективности искрового разряда, практически устраняющим рост побочных стримеров и делающим разряд одноканальным и строго прямолинейным, является также метод радиационного поджига [63].

Для его осуществления на одном из электродов (преимущественно заземленном) устанавливается защищенная капсула с радиоактивным препаратом или лазерное устройство, создающее в жидкости узкий ионизированный канал в заданном направлении (рис. 2.4). Получив в свое распоряжение ионизированный путь, разряд направляется по нему, не затрачивая свою энергию на создание бесполезных побочных стримеров. Все это делает разряд более мощным и строго прямолинейным, а значит, и более длинным, что в совокупности повышает его механический КПД.

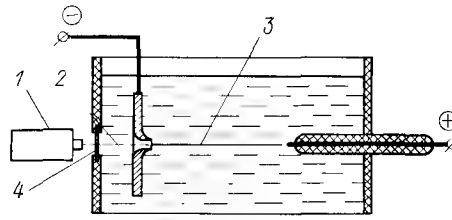


Рис. 2.4. Схема устройства с радиационным (лазерным) поджигом рабочего искрового промежутка в жидкости:
1 — источник лазерного луча или капсула с источником проникающей радиации; *2* — лазерный луч или луч проникающей радиации, *3* — канал разряда; *4* — впускное окно

2.2. Тепловой взрыв

Воспроизведение электрогидравлического эффекта при помощи электрического теплового взрыва значительно расширяет возможности его практического использования [3, 5, 6, 7, 23]. Для реализации этого способа электроды различных электрогидравлических устройств замыкаются тонкой проводящей проволокой, лентой или трубкой, представляющей собой взрывающийся тепловой элемент (ВТЭ). Искровой разряд между электродами заменяется тепловым взрывом проводящего ток элемента, замыкающего электроды, чем заранее задается путь разрядного канала и его конфигурация. Использование теплового взрыва позволяет полностью устранить стример, а значит, и энергетические потери, составляющие до 10 % общего количества энергии разряда, которые расходовались на предзарядной стадии процесса. Хотя эти потери заменяются потерями на нагревание и испарение проводящего элемента в жидкости, они при этом во многих случаях оказываются несколько меньшими, чем потери на прорастание стримера между электродами, а механический КПД — несколько бо́льшим механического КПД обычного искрового разряда. Возникающий при этом электрогидравлический удар не отличается от электрогидравлического удара, образованного обычными средствами [23].

Преимуществами способа являются возможности осуществления электрогидравлических ударов вблизи проводящих объектов (непосредственно на их поверхности), получения локализованных направленных ударов по любому наперед заданному контуру, и осуществления электрогидравлических ударов в растворах сильных электролитов, а также в расплавах некоторых металлов и солей [71]. Применение этого способа позволяет использовать

как высокие, так и низкие напряжения при обязательном обеспечении малой длительности и большой крутизны фронта импульса тока.

Для низких напряжений это условие выполняется путем применения современных средств коммутации токов (например, тиратронов или игнитронов).

Взрывающиеся тепловые элементы (ВТЭ) могут иметь самую причудливую, заданную условиями форму и изготовляться из различных проводящих или даже полупроводящих материалов. Длина и особенно площадь токопроводящего сечения этих элементов подбираются так, чтобы импульс тока вызывал мгновенное их испарение. Однако полное испарение проволоки, ленты, трубки или ВТЭ каких либо других форм не является обязательным или необходимым. Для уменьшения энергии и обеспечения рационального хода процесса разряда это испарение должно быть таким, чтобы неиспарившиеся частицы этих элементов оказывались достаточно мелкими, не способными образовывать проводящие мостики для разряда, что могло бы привести к полному исчезновению в этих местах канала разряда, а следовательно, к резкому ослаблению электрогидравлического удара или даже к полному исчезновению его.

Материалами для ВТЭ могут быть алюминий, медь, нихром, проводящая паста, электролит в проводящей трубке, металлические опилки, металлизированная бумага и т. д. Но наиболее рациональными для ВТЭ являются проводящие материалы с малой энергией испарения, неспособные после своего взрыва создавать долгоживущие проводящие комплексы, но создающие некоторое количество полезных для процесса примесей, ионизирующих канал.

Необходимо отметить, что каждый ВТЭ фактически осуществляет искусственное короткое замыкание рабочего искрового промежутка, а следовательно, и всего разрядного контура схемы. Поэтому нет необходимости в усиленной изоляции всех проводников контура, ведущих к ВТЭ. Это во многом упрощает работу устройств, основанных на использовании теплового взрыва.

Все ВТЭ могут быть как одноразового действия (заменяемые после каждого теплового взрыва), так и постоянно возобновляемые путем непрерывной или синхронизируемой с разрядом подачи их преимущественно через заземленный электрод. Принципиальная схема устройства с непрерывно заменяемым взрывающимся тепловым элементом приведена на рис. 2.5,*а*. Применение проволочных ВТЭ целесообразно почти во всех случаях, так как одноразовый проволочный ВТЭ может быть легко изогнут по заданному контуру, рассчитанному или подобранному опытным путем. В ряде случаев в качестве ВТЭ используют проводящую ленту. Например, изогнув ленту (рис. 2.5,*б*) в поперечном направлении, при тепловом взрыве можно получить узкую и длинную кумулятивную струю, способную локально выдавливать, изгибать, резать, выру-

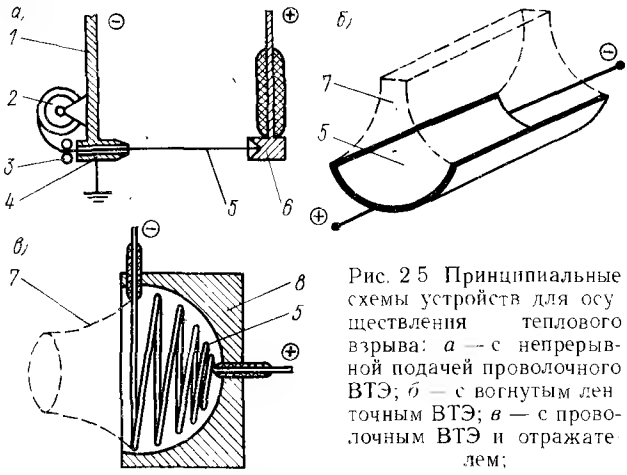


Рис. 2 5 Принципиальные схемы устройств для осуществления теплового взрыва: *а* — с непрерывной подачей проволочного ВТЭ; *б* — с вогнутым ленточным ВТЭ; *в* — с проволочным ВТЭ и отражателем;

1 — отрицательный электрод; *2* — катушка с проволочным ВТЭ; *3* — подающие ролики; *4* — головка подачи; *5* — ВТЭ; *6* — контактная втулка положительного электрода; *7* — форма кумулятивной струи; *8* — отражатель

бать или обрубать изделия. Кумулятивную струю можно получить и при тепловом взрыве проволочного ВТЭ, используя отражатель (рис. 2.5,*в*). Еще более многообразные возможности открывает применение в качестве ВТЭ разного рода трубок или других объемных трубчатых элементов. При тепловом взрыве такого элемента внутри него по оси могут возникать весьма большие давления. Однако получение достаточно тонкостенных трубчатых (объемных) ВТЭ обычным путем затруднительно.

Так как кратковременные импульсные токи, которые использует электрогидравлика, аналогичны одному полупериоду некоторого высокочастотного тока соответствующей частоты, прохождение их через проводники обладает рядом особенностей, присущих высокочастотным токам. Так, если достаточно мощный импульс тока от электрогидравлической силовой установки подвести к противоположным по диагонали углам прямоугольного листа тонкой фольги, то лист испарится по диагональному участку, несколько расширяющемуся посередине листа. На рис. 2.6 изображен лист фольги после прохождения импульса. Характерный вид испарившейся части, имеющей чечевицеобразную форму, говорит о

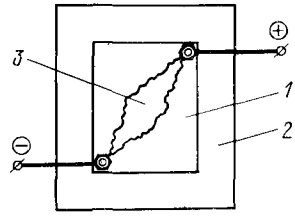


Рис. 2.6. Схема теплового взрыва тонкой пластинки, протяженной в поперечном к току направлении:

1 — лист фольги, наклеенный на диэлектрик, *2* — пластинка диэлектрика; *3* — испарившийся участок листа фольги

том, что при осуществлении тепловых взрывов поперечно протяженных к току поверхностей следует иметь в виду указанные особенности прохождения по ним импульсных токов и соответственно осуществлять токоподвод к ним.

Опытным путем установлено, что подведение импульса тока к такого рода поперечно протяженным к току плоским или объемным ВТЭ должно осуществляться либо по треугольным для плоских элементов (рис. 2.7,*а*), либо по конусным для объемных элементов (рис. 2.7,*б*) токоподводам с тем, чтобы распределение токов в этих элементах было равномерным, обеспечивающим тепловой взрыв по всем их сечениям, а следовательно, и полное испарение ВТЭ [6].

Для получения ВТЭ любой формы или объема был предложен метод предварительного изготовления заданного объемного каркаса будущего ВТЭ из бумаги (например, промасленной) с последующей оклейкой его тонкой фольгой или нанесением на его поверхность (металлизацией или распылением) металлического или другого проводящего слоя [82]. Такой каркас обеспечивает необходимую предварительную жесткость всей конструкции ВТЭ и проводящего слоя и не мешает взрыву. Тепловой взрыв, осуществленный с помощью ВТЭ, выполненного подобным образом, аналогичен тепловому взрыву металлического ВТЭ.

Сверхвысокие давления в каком либо небольшом локальном объеме могут быть получены тепловым взрывом ВТЭ, выполненного в виде двух полых конусов, сопряженных своими основаниями, внутри которых помещается обрабатываемый объект (рис. 2.8). Поскольку площадь сечения конуса у вершины значительно меньше, чем у основания, тепловой взрыв будет неравномерным: сначала взорвется вершина конуса, а затем основание. От вершины к основанию побежит кумулятивная взрывная волна, которая, встретившись с такой же волной, образованной вторым конусом, создаст в месте их контакта всплеск объемных сверхвысоких давлений [98].

При увеличении энергии импульса (при постоянных длине, сечении и материале ВТЭ) возрастает температура взрыва, а значит, и диаметр образующегося плазменного шнура. Это приводит к резкому уменьшению омического сопротивления плазменного канала и, следовательно, к не менее резкому уменьшению выделяемой энергии. В результате этих процессов конечный диаметр

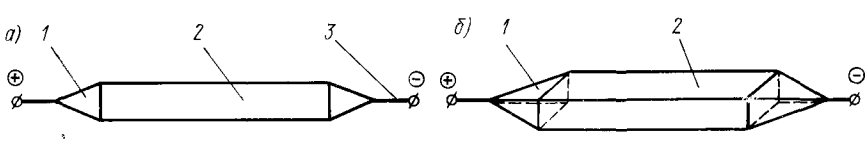


Рис. 2.7. Схема конструкций токопроводов: *а* — к плоскому ВТЭ, *б* — к объемному ВТЭ;
1 — токопровод, *2* — тело ВТЭ, *3* — толстый проводник к токопроводу

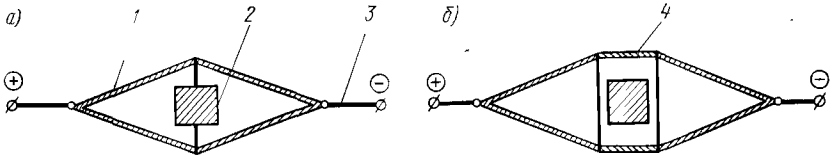


Рис. 2.8. Схема устройства для осуществления теплового взрыва спаренных конусов: *а* — вариант из двух конусов; *б* — вариант из конусов со вставкой: *1* — объемный полый конус ВТЭ; *2* — обжимаемое изделие; *3* — токопровод, *4* — цилиндрический ВТЭ между конусами

плазменно-газового облака, образующегося после взрыва в объеме жидкости, и так называемые периферийные давления, возникающие в ней, а следовательно, и разрушающий или деформирующий эффект взрыва оказываются растущими не пропорционально нарастанию энергии импульса тока, поступающей в рабочий промежуток, а значительно медленнее, поэтому механический КПД электрогидравлической обработки начинает снижаться.

При электрогидравлических ударах в жидкости закон убывания давлений с расстоянием близок к квадратичному, поэтому было введено понятие «периферийные» давления, т. е. давления, которые при данном объеме достигают стенок или какой-либо заданной точки сосуда. Введение этого понятия оказалось тем более оправданным, что при различной мощности импульсов давления, создаваемые вблизи канала разряда, могут отличаться друг от друга не более чем на один (редко на два) порядок, в то время как периферийные давления при одной и той же энергии разряда или теплового взрыва в одном и том же сосуде, но на различных расстояниях от канала разряда могут отличаться друг от друга на много порядков [3].

Для получения максимального, не снижающегося с ростом энергии механического КПД при все более возрастающей энергии современной электрогидравлической обработки материалов следует одновременно и пропорционально росту энергии разряда увеличивать длину взрывающихся тепловых элементов (оставляя неизменными их материал и сечение). Но, поскольку увеличение длины взрывающегося теплового элемента сопряжено с необходимостью его оптимального размещения над обрабатываемым изделием (например, над штампуемым), то естественным выходом из этого положения является сокращение его длины над изделием либо путем образования плоских зигов, либо намоткой элемента в объемную спираль. В подобном выполнении взрывающихся тепловых элементов состоит конструктивное решение метода концентрации энергии теплового взрыва [6].

Метод заданной концентрации и распределения энергии сводится к тому, что бо́льшим или меньшим сосредоточением числа витков, зигов и других деталей каждого отдельного ВТЭ, применением переменного диаметра или изменением числа отдельных проволочек различных ВТЭ в данной точке объема камеры элект

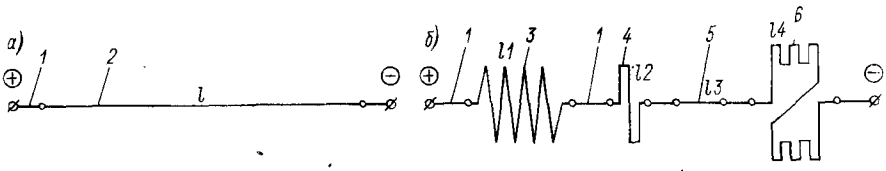


Рис. 2.9. Принципиальная схема осуществления метода концентрации энергии:
а — общий случай, *б* — метод концентрации энергии;
1 — токопровод, *2* — проволочный ВТЭ; *3—6* — различные формы ВТЭ при условии, что $l = l1 + l2 + l3 - l4$ и при одинаковом диаметре проволок

рогидравлической обработки материалов, например штамповки (рис. 2.9), автоматически получают сосредоточение (или рассредоточение) той энергии, которая должна выделиться в данном объеме камеры при тепловом взрыве заданного числа элементов. Таким путем можно с достаточной точностью распределять энергию в каждом объеме или в каждой точке пространства над поверхностью обрабатываемого изделия в рабочей камере электрогидравлического устройства, добиваясь необходимого воздействия на обрабатываемый материал.

При осуществлении теплового взрыва ВТЭ для образования проводящего мостика в рабочем искровом промежутке было предложено использовать проводящую металлизированную пасту необходимой консистенции. Принципиальный вариант устройства, использующего проводящую пасту, приведен на рис. 2.10. В таких устройствах на одном из электродов в каждой паре или группе их оборудуется канал, соединенный с резервуаром питания, откуда обычными средствами (например, под давлением) непрерывно или синхронно с импульсами подается проводящая паста. Паста должна обладать свойствами проводника и не растворяться в данной рабочей жидкости. Состав пасты подбирается таким образом, чтобы ее плотность была больше или равнялась плотности жидкости.

Во избежание изломов и разрывов столбика пасты ее армируют. Для этого в ее состав вводят короткие обрезки штапеля естественного или полимерного волокна, обрезки спутанной микропроволоки или то и другое вместе. Армирование повышает прочностные свойства образующихся стержней, позволяет выполнить их более тонкими, что является очень существенным обстоятельством для развития разряда и повышения эффективности электрогидравлического удара.

Следует отметить, что непрерывная подача ВТЭ может нарушаться, поскольку ток может приваривать подаваемый элемент к втулке подающего устройства. Приспособление, предотвращающее такое приваривание, изображено на рис. 2.11 [73].

Тепловой взрыв может осуществляться также в высокотемпературной жидкости, газовой или плазменной среде. Наиболее рационально применение этого способа в тех случаях, когда требуется направленное изменение структуры или свойств мате-

риала. В настоящее время его успешно применяют в металлургии для улучшения структуры слитков [5, 71].

Значительную практическую ценность представляют способы осуществления теплового взрыва в пластической, сыпучей, самотвердеющей или полимеризующейся среде. Опыты по получению пластиграфических отпечатков действия электрогидравлических ударов [7] показали, что пластические среды или сыпучая среда (типа песка) также способны передавать давления, возникающие при искровом разряде или электрическом тепловом взрыве токопроводящего элемента на обрабатываемые объекты.

Дальнейшие работы в этом направлении экспериментально доказали возможность применения теплового взрыва в сыпучей, пластической, самотвердеющей или полимеризующейся среде, состоящей из частиц твердого или эластичного диэлектрика или из частиц вещества со слабой электронной или ионной проводимостью, для развальцовки, обжатия, штамповки, упрочнения, наклепа и других технологических операций в машиностроении и металлообработке [66].

Использование песка в качестве передающей среды позволяет осуществить метод регулирования бризантности действия тепло-

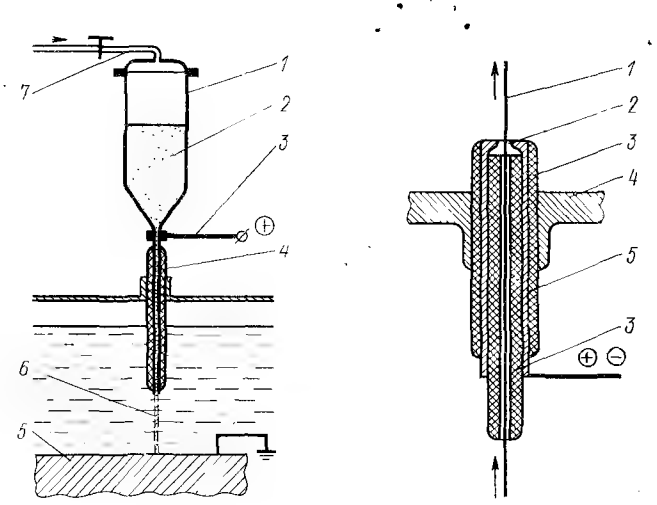


Рис 2.10 Устройство для подачи в рабочий промежуток пастообразного ВТЭ:

1 резервуар для пасты; *2* – пастообразный ВТЭ, *3* – токоподвод, *4* изолированный полый положительный электрод, *5* – обрабатываемое изделие – второй электрод; *6* выход пастообразного ВТЭ, *7* — подача сжатого воздуха

Рис. 2.11. Схема устройства, устраняющего приваривание проволочного ВТЭ

1 проволочный ВТЭ; *2* — искровой зазор; *3* — диэлектрические втулки; *4* стенка ванны с жидкостью, *5* трубчатый токопровод

вого взрыва путем внесения в сухой песок, заполняющий полость (например, внутри раздаваемого формуемого изделия), очень небольшого количества легко смачивающих песок жидкостей (воды, керосина, бензина, эфира и т. п.). Мгновенно испаряясь при тепловом взрыве, пары этих веществ, включаясь в общий процесс, придают (обычно бризантному действию теплового взрыва) иногда недостающую ему метательность. Применение способа позволяет как бы растянуть во времени усилия теплового взрыва, сделать пик давлений его более широким и снизить их амплитуду до заданного предела. Изменять характер передаваемых таким способом давлений можно путем подбора состава наполнителей, жидкостных добавок, материала ВТЭ и электрических параметров генератора импульсов тока. Число взрывающихся тепловых элементов, свойства материала наполнителя, добавок и состав ВТЭ в каждом конкретном случае определяются технологическим режимом обработки изделия или материала.

Если при высоковольтном разряде в жидкости на КПД трансформации электрической энергии в механическую большое влияние оказывает ее удельная электропроводность, то в случае взрыва ВТЭ удельная электропроводность материала-наполнителя практически никакой роли не играет. Эластичность частиц сыпучей или пластической массы снижает эффект, но в тонких прослойках и при достаточных энергиях импульса тока на конечный результат влияет незначительно.

Дальнейшее совершенствование метода теплового взрыва и расширение его практических возможностей были направлены на увеличение энергии взрыва, повышение КПД гидродинамического действия электрогидравлического эффекта. Установлено, что тепловой элемент, состоящий из энергонесущего материала и окислителя, может вызвать взрыв этой смеси веществ, невзрывоопасных при обычных температурах, но способных к возникновению в них взрывных цепных реакций при температурах около 40 000 °С, возникающих при тепловом взрыве ВТЭ.

В связи с этим предложен к использованию комбинированный взрывающийся тепловой элемент (КВТЭ), в котором в качестве энергонесущего материала применяют керосин, бензин, угольный порошок, алюминиевую пудру, а в качестве окислителя — марганцевокислый калий, хромпик, бертоллетову соль, сильные кислоты, окислители ракетных горючих. Конструктивно устройство комбинированного взрывающегося теплового элемента предложено в двух вариантах: 1) взрывающийся тепловой элемент размещают в емкости с диэлектрическими стенками, заполненной энергонесущим материалом и окислителем; 2) взрывающийся тепловой элемент выполняют в виде трубки, которую заполняют смесью энергонесущего материала и окислителя. Формы комбинированных взрывающихся тепловых элементов так же как и формы емкостей, в которых размещены ВТЭ, различны и зависят от их конкретного назначения.

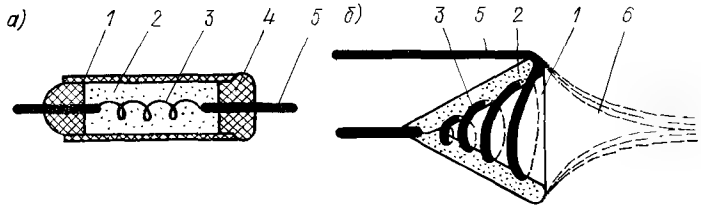


Рис. 2.12. Схема комбинированных ВТЭ с диэлектрическими стенками, выполненных в виде витков проволоки, размещенной в цилиндрической емкости (*а*) и в емкости конусной формы (*б*): *1* — диэлектрическая оболочка, *2* - смесь энергоиесущего материала и окислителя; *3* — проволочный ВТЭ, *4* - диэлектрическая пробка; *5* – токопроводы; *6* — кумулятивиая струя

На рис. 2.12, *а* изображен комбинированный взрывающийся тепловой элемент, который выполнен в виде витков проволоки, размещенной в цилиндрической емкости, а на рис. 2.12, *б* - комбинированный взрывающийся тепловой элемент в виде витков проволоки, размещенной в корпусе емкости, имеющей форму конуса. Тепловой элемент может быть выполнен и в виде токопроводящей трубки, внутри которой размещена смесь горючего и окислителя (рис. 2.13). Взрывные химические реакции, возникающие между окислителем и горючим, являющиеся составной частью комбинированного взрывающегося теплового элемента, значительно увеличивают длительность и энергию механического действия электрогидравлического удара, в результате чего повышается КПД эффекта, расширяются возможности его практического применения.

В заключение хотелось бы отметить следующее. В 1963 г. издательство «Иностранная литература» выпустило (в переводе с английского языка) сборник статей «Взрывающиеся проволочки», изданный в Англии и США в 1959 г. В английском предисловии его авторы утверждали, что «...нигде ни на каком языке нет книги или хотя бы раздела книги по вопросам электрического взрыва проволочек...» (Взрывающиеся проволочки. Сб. статей. М.: Иностр. лит-ра, 1963, с. 7). Однако в нашей стране предложения об использовании взрывающихся тепловых элементов (или, что то же самое, взрывающихся проволочек) появились и были опробованы на практике еще в 1952 г. [23]. Практическое значение теплового взрыва ВТЭ освещалось в работе [7], а позже этому вопросу уже был посвящен специальный раздел книги [5], в которой были описаны практические возможности использования этого метода не только в горном деле или металлообработке,

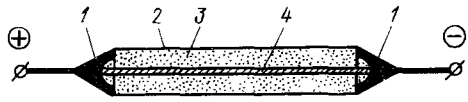


Рис. 2.13. Схема комбинированного ВТЭ: *1* — концы трубки, подсоединенные к токоподводам; *2* — токопроводящая трубка ВТЭ; *3* — смесь энергоносителя и окислителя; *4* — обрабатываемый объект

но и в плазменных реактивных двигателях. В 1965 г. издательством «Мир» был выпущен второй переводной сборник «Электрический взрыв проводников», посвященный тем же взрывающимся проволочкам, в котором описан и ряд работ автора, выполенных задолго до зарубежных.

2.3. Электропневматика

Третий по значению метод, который расширяет возможности практического использования электрогидравлического эффекта,— электропневматический метод обработки материалов [5, 20]. Механическое воздействие сверхвысоких давлений на материал происходит здесь не в жидкой, а в газообразной среде осуществлением в ней разрядов или тепловых взрывов ВТЭ. Газообразная среда почти в миллион раз более сжимаема, чем жидкость, поэтому и соответствующий механический эффект будет выражен в ней слабее. Однако специальными приемами можно значительно усилить эффект и с успехом применять этот метод на практике.

Так, осуществляя разряд в узком или капиллярном канале, можно получить в нем значительные давления и интенсивный выброс плазмы, аналогичный выбросу низкотемпературной плазмы из реактивных двигателей. Этот вариант эффективно используется в современной горной технике для бурения горных пород.

Различные комбинации электропневматического метода с методом теплового взрыва позволяют получить еще более эффективное разрушение, поскольку тяжелые пары металлов, включенные в струю плазмы, двигающуюся с огромными скоростями, способны оказать мощное воздействие на материал. Особый интерес представляет применение комбинированных вариантов использования электрогидравлического эффекта для двигателей с металлическим топливом. Один из вариантов использования способа предполагает преимущественно тепловое действие высокотемпературной плазмы и направление механического действия только на удаление продуктов, разрушенных тепловым взрывом.

Электропневматическое воздействие на обрабатываемые непроводящие объекты, окружающие разряд в газовой среде, может осуществляться как искровым, так и кистевым разрядом. Однако воздействие на обрабатываемые проводящие объекты (например, металлические порошки) может быть осуществлено только методом теплового взрыва путем размещения в газовой среде тонких (например, металлических) проводников или капилляров, заполненных проводящей жидкостью или пастой, с последующим электрическим тепловым взрывом их [6].

В непосредственной связи с описанным выше электропневматическим методом рассмотрим представляющий значительный интерес процесс так называемого «преимущественного пробоя». Оказалось, что при коротком времени воздействия электрогидравлического эффекта возможен преимущественный (перед

жидкостью) пробой твердых непроводящих материалов, погруженных в жидкость. Явление это было установлено опытным путем еще в 1950 г. Представляется правомерным следующее объяснение этого явления.

Известно, что встречающиеся в природе твердые диэлектрики не являются строго однородными, но представляют собой сложный конгломерат кристаллических и аморфных образований, в состав которого входят микроскопические полости, заполненные смесями газов и различными растворами солей. В них также содержатся чисто проводящие (например, рудные) микроскопические включения. Различные газы и жидкие растворы как химико механические включения входят даже в состав кристаллов и молекул. Известно также, что если на пути разряда разместить цепь газовых пузырьков или вакуолей, заполненных растворами солей, а среду, окружающую их, электрически сделать более прочной (т. е. смоделировать то, что мы, по сути дела, имеем в естественном твердом теле), то разряд пойдет только по этим вакуолям, пузырькам и другим включениям.

Именно это и наблюдается на практике. Опыт показывает, что любое твердое тело — диэлектрик (например, керамика и т. п.),— имеющее массу пор, заполненных как газами, так и жидкостями, будучи погружено в воду, легче всего пробивается разрядом не «по верху», т. е. даже не скользящим разрядом, а именно и только «через твердое тело», т. е. сквозь него. Не требуется сверхкоротких импульсов, чтобы убедиться в том, что даже такой плотный материал, как фильера из белого термокорунда, спрессованная и спеченная в форме, также пробивается таким образом через материал. Именно в опыте над этим материалом мы и обнаружили так называемое явление вхождения разряда в материал.

Материалы с рудными включениями, естественно, еще более ярко демонстрируют это «вхождение», что и отмечено еще в ранних работах [4, 5].

На рис. 2.14 схематично приведен процесс «преимущественного пробоя» твердого диэлектрика. Из схемы видно, что на участках от электродов до места входа канала в материал процесс разрушения будет только электрогидравлическим, а на участке от входа до выхода канала из материала — электропневматическим.

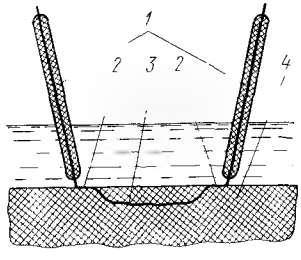


Рис. 2.14. Схема процесса «преимущественного пробоя» твердого диэлектрика в жидкости:
1 — электроды; *2* — часть канала разряда, проходящего по поверхности диэлектрика, *3* — часть канала разряда, развивающегося внутри диэлектрика, *4* — твердый диэлектрик

Стремясь практически использовать все возможности электропневматического метода и с учетом того, что для образования канала «преимущественного пробоя» в твердом диэлектрике необходим импульс очень малой длительности, а получить его с энергией, достаточной для эффективного разрушения, крайне трудно, мы предложили воспользоваться для «прожигания» начального канала в диэлектрике током высокой частоты достаточно большого напряжения, каждая полуволна которого и есть тот самый сверхкороткий импульс, который нам нужен, а уж затем с помощью обычных средств электроники и автоматики наложить на получившийся канал (в момент его образования) любой мощный импульс тока достаточно низкого, а потому и безопасного, напряжения с любой наперед заданной энергией этого импульса, который и вызовет необходимое нам эффективное электропневматическое разрушение материала (метод комбинированного воздействия) [3].

2.4. Методы пространственно-временно́го управления энергией электрогидравлического эффекта

Разработанные методы управления энергией электрогидравлического эффекта обеспечивают самые разнообразные виды электрогидравлической обработки материалов, позволяют наиболее рационально и полно использовать на практике все его многообразные возможности.

Метод «грязного забоя». Этот метод позволяет с помощью изменения неэлектрического фактора влиять на электрические параметры разряда, приводя форму импульса тока к наиболее выгодной (близкой к апериодической), обеспечивающей нормальную работу различных электрогидравлических устройств в сложных условиях [41]. Еще в 1950 г. было установлено, что повышение объемного содержания различных твердых, жидких и газообразных (не растворенных в жидкости) примесей существенным образом влияет на протекание разряда в этой жидкости. Оказалось, что такие примеси по мере увеличения их объемного содержания в жидкости все более и более затрудняют прораста ние стримеров по извилистому пути между мелкими, плотно расположенными частицами включений. Увеличение их содержания делает жидкость более прочной к пробою разрядами, по сути дела увеличивая ее механическое сопротивление развитию пробоя, хотя электрическое сопротивление жидкости при этом может и не возрастать. В опытах было установлено, что стример, а с ним и искровой разряд, избегают проходить через объем жидкости между электродами, предпочитая огибать его довольно длинной дугой сверху или снизу. Это «избегание» отсутствует в нескольких первых разрядах и проявляется достаточно ярко только при частом их повторении. Причиной такого поведения разрядов являются микроскопические пузырьки газов, обильно

выделяющиеся в этом объеме после каждого электрогидравлического удара и в большом количестве скапливающиеся в нем уже после двух-трех первых ударов. Из-за своей микроскопически малой величины эти пузырьки почти не всплывают, надолго задерживаясь в объеме жидкости между электродами. Очевидно, что именно эти пузырьки, создавая зону с повышенным содержанием механических газообразных примесей, и вынуждают разряд огибать ее, идя путем наименьшего сопротивления по границам этой зоны, поскольку пробой по прямой линии, через пузырьки, требует большего напряжения, чем по линии, огибающей эту зону.

Эти наблюдения послужили основанием для установления закономерности влияния неэлектрических факторов (повышения объемного содержания обрабатываемого материала) на электрические параметры разряда, позволяющие приводить форму кривой импульса тока к наиболее выгодной (близкой к апериодической) и предложить метод управления разрядом, названный методом «грязного забоя». Название метода было взято из буровой техники, поскольку все явления, связанные с ним, впервые были установлены в опытах по электрогидравлическому бурению [4].

Сущность метода сводится к тому, что при работе с искровым разрядом на электрогидравлических установках вместе с повышением объемного содержания в жидкости каких-либо механических примесей (например, частиц обрабатываемого материала, пузырьков газа и т. п.) и уменьшением диаметра этих частиц возрастает и напряжение, необходимое для пробоя существующего в этих установках рабочего искрового промежутка.

На практике этот способ может быть реализован в различных электрогидравлических устройствах, оптимальный режим работы которых обеспечивается простым регулированием объемного содержания механических примесей в жидкости, заполняющей камеру обработки, независимо от принятого режима обработки.

Так, при работе на электрогидравлических дробилках, ориентировочно установив напряжение, необходимое для пробоя данного рабочего промежутка, и начав работу без подачи воды в зону разряда, достигают того, что содержание примесей (т. е. частиц самого обрабатываемого материала) в зоне разряда по мере измельчения этого материала будет все время возрастать и наконец достигнет такого предела, когда установленного напряжения окажется уже недостаточно для пробоя, а искровая форма разряда перейдет в кистевую и процесс дробления прекратится. Однако стоит только начать подачу воды в зону разряда, как кистевые разряды сменятся искровыми и процесс дробления возобновится. Наблюдая на экране осциллографа возникающие при этом изменения формы кривых импульсов тока, можно установить, что момент возобновления процесса дробления соответствует появлению теоретически идеального и самого экономичного варианта — апериодической формы кривой импульса тока, а значит, и выходу устройства на оптимальный режим его работы.

Особое значение этот метод имеет для электрогидравлического бурения, дробления и других процессов [3, 5].

Метод автоматического распределения (вращения) разрядов. Предложенный метод прямо вытекает из метода «грязного забоя» и позволяет вращать разряды по всем радиусам сечения рабочей камеры электрогидравлического устройства и обеспечивать максимально возможные размеры активной зоны воздействия с автоматическим разрушением (или обработкой) сначала наиболее крупных, а затем уже мелких объектов [3, 4].

Сущность метода заключается в следующем. Поскольку пробивное напряжение данного рабочего искрового промежутка зависит от объемного содержания примесей, находящихся в жидкости, заполняющей камеру обработки, то при данном рабочем напряжении и стабильной длине всех возможных искровых промежутков разряд прежде всего пройдет там, где эти частицы крупнее, т. е. где объемное содержание обрабатываемого материала (примеси) мало. Пройдя по этому пути, первый разряд разрушит вокруг себя материал, измельчит его, а следовательно, и автоматически повысит его объемное содержание в этой области, чем сделает практически невозможным прохождение по этому же пути следующего разряда, который направится теперь уже по другому пути, имеющему меньшее сопротивление, а значит, и наибольшую в данном случае крупность материала. Последующие разряды приведут к тому, что объемное содержание материала в рабочей камере станет практически одинаковым. При этом если в дальнейшем не снизить объемное содержание избыточного материала (например, подачей воды, удаляющей материал), то искровые разряды и работа устройства прекратятся.

На практике в электрогидравлические устройства, где материал по технологии обработки по мере измельчения должен быстро удаляться из зоны электрогидравлических ударов (например, в дробилках), вводят новые порции исходного материала в количестве, пропорциональном удаленному продукту, для поддержания в устройстве необходимого оптимального объемного содержания примесей. В тех электрогидравлических устройствах, где материал выносится из зоны электрогидравлических ударов быстрее, чем он концентрируется в ней в нужных пределах (например, при электрогидравлическом бурении горных пород), следует принудительно поддерживать в этой зоне необходимую степень объемного содержания примесей.

Таким образом, регулированием подачи воды в зону разряда достигается не только постоянство оптимального режима, но и автоматическое распределение разрядов по всем возможным для данного случая путям их возникновения, практически без повторения следования их дважды по одному и тому же пути, что снижало бы эффективность работы электрогидравлических устройств.

Метод управления направленностью действий электрогидравлических ударов. Этот метод позволяет с помощью разного рода

твердых или газовых отражателей получать самые разнообразные искажения формы полости кавитации, приводящие в конечном счете к усилению действия электрогидравлических ударов в заданном направлении [5]. Известно, что при осуществлении электрогидравлического удара в значительном объеме жидкости образующаяся при разряде кавитационная полость обычно имеет правильную форму, обусловленную спецификой самого процесса ее образования. Применяемые с целью изменения поведения возникающего при ее захлопывании кавитационного гидравлического удара различные отражатели представляют собой разной формы упругие пластины из материалов, стойкость которых к разрушающему действию электрогидравлических ударов возрастает в этом ряду слева направо (из резины, текстолита, полиэтилена, капрона, нейлона).

Ориентированная различным образом относительно разряда пластина отражателя вызывает действия, приводящие к искажению возникшей кавитационной полости и внешне проявляющиеся в своеобразной «фокусировке» или отражении механических усилий, возникающих при электрогидравлических ударах. Очевидно, что при этом оказывается «сфокусированным» и ультразвуковое излучение электрогидравлического эффекта, что дает повод в дальнейшем рассматривать этот метод как новый метод «фокусирования» ультразвука кумуляцией [98].

Некоторые процессы, происходящие при возникновении и развитии кавитационных полостей в различных условиях их возникновения, показаны на рис. 2.15, *а—е*. Кавитационная полость,

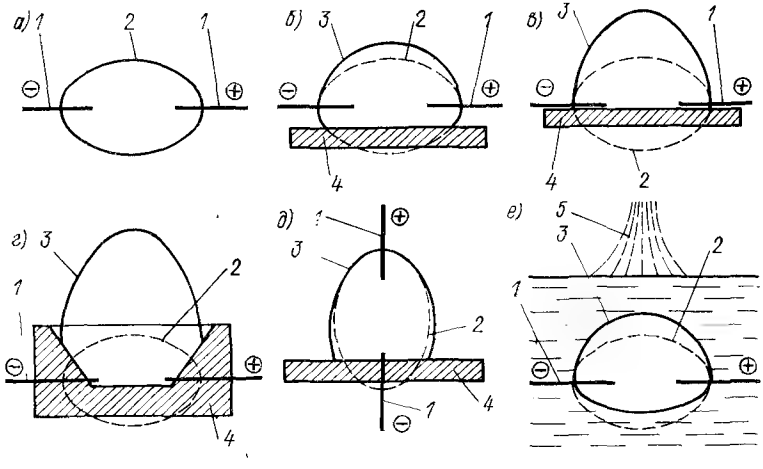


Рис. 2.15. Схемы искажения кавитационной полости с помощью отражателей:

1 — электроды; *2* — границы кавитационной полости в свободном объеме жидкости, *3* — граница искаженной кавитационной полости, *4* — отражатель; *5* — выброс жидкости

развивающаяся в свободном объеме жидкости между электродами, имеет характерную резко очерченную границу (рис. 2.15, *а*). Если вблизи электродов поместить пластинчатый отражатель из эластичного материала, то полость кавитации исказится и ее граница займет положение, указанное на рис. 2.15, *б*. При дальнейшем приближении отражателя к электродам (рис. 2.15, *в*) искажение полости кавитации будет еще более резко выраженным. Если отражателю придать специальную форму (рис. 2.15, *г*), то искажение полости станет максимальным. При размещении отражателя перпендикулярно к линии электродов (рис. 2.15, *д*) захлопывание полости дает резко выраженную кумулятивную струю, направленную в сторону отражателя. При расположении электродов вблизи свободной поверхности жидкости (рис. 2.15, *е*) также произойдет искажение полости кавитации. Кроме того, может произойти еще и выброс тонкого столба жидкости при сравнительно глубоком погружении либо выброс жидкости в виде «куста» вплоть до выброса всей «чашки» жидкости над электродами.

Случай, приведенный на рис. 2.15, *в*, представляет большой интерес в отношении действия сил, возникающих при электрогидравлическом ударе, на отражатель. Отражатель в момент возникновения основного удара испытывает силу, действующую на него в направлении от полости. При захлопывании полости снова создается удар по отражателю, направленный в ту же сторону, что и в первом случае. Таким образом, возникает явление, при котором действие и отраженное противодействие создают усилие, направленное в одну и ту же сторону, и протекают они не одновременно, а в два приема. Использование этого явления может найти применение в некоторых устройствах (например, в двигателях) [32].

Метод резонансного разрушения материалов. Резонансные явления возникают при электрогидравлической обработке материалов (например, при дроблении твердых пород) в случае совпадения частот собственных колебаний частиц обрабатываемого материала с частотой гидроакустического излучения расширяющегося канала разряда в жидкости [3, 42]. Опыты показали, что при работе электрогидравлических устройств можно охватить достаточно большой диапазон частот одновременно и таким образом создать условия для интенсивного резонансного разрушения. Это достигается одновременной работой в одной разрушающей электрогидравлической установке (например, дробилке) трех или более рабочих искровых промежутков, работающих на разных режимах (например, от самого мягкого, когда работа ведется на больших емкостях и малых напряжениях, до самого жесткого, когда работа ведется на малых емкостях и больших напряжениях). При этом в конструкции дробилки предусматривают установку нескольких пар электродов (вторым электродом является корпус дробилки), работающих одновременно, но питаемых каж-

дый от самостоятельного разрядного контура (зарядные контуры питаются от общей силовой установки).

Предложенный метод резонансного разрушения материалов основан на том, что расширением спектра гидроакустических излучений при электрогидравлических ударах в результате одновременной работы на разных режимах в одном электрогидравлическом устройстве обязательно произойдет совпадение частоты и амплитуды гидроакустических колебаний электрогидравлических ударов с собственными частотами колебаний какой-либо группы частиц обрабатываемого материала. Таким образом, для успешного осуществления резонансного разрушения материала необходимо создать взаимные разнофазные резонансные колебания в материале сразу нескольких групп частиц с достаточными для расслаивания амплитудами колебаний.

Метод ступенчатой подачи энергии. Этот метод позволяет повысить КПД электрогидравлической установки за счет исключения потерь в начальный период развития разряда и заключается в том, что канал искрового разряда необходимой длины создается слабым импульсом высокого напряжения, а затем в образовавшийся канал разряжается основной накопитель генератора импульса тока. Для этого генератор импульсов тока электрогидравлической установки выполняют с двумя разрядными контурами: в одном устанавливают маленькую емкость накопителя, рассчитанную на заряд от 30 до 70 кВ, в другом - большую емкость, рассчитанную на заряд от 5 до 20 кВ.

Формирование стримера между электродами достигается подключением к нему вначале накопителя с высоким потенциалом напряжения, а при замыкании стримером электродов автоматически подключается накопитель с большой емкостью малого напряжения. В результате в жидкости возникает канал разряда достаточно большой протяженности и с высокой плотностью энергии, вследствие чего резко возрастает эффект механического действия электрогидравлического удара на обрабатываемый объект. Метод имеет большое практическое значение, так как для различных видов электрогидравлической обработки материалов (штамповки, развальцовки, взрывания негабаритов) применение высоких напряжений диктуется только необходимостью получения достаточно длинного искрового разряда, обладающего высоким механическим действием.

Метод «воздушной кавитации». В 1953 г. было обнаружено явление, сопровождающее электрогидравлический удар, при условии его возникновения под небольшим слоем жидкости [43]. Как оказалось, достаточно мощный разряд вызывает два своеобразных явления; значительный объем жидкости над разрядом, получив ускорение вверх, отрывается от всей остальной массы жидкости и в виде крупных, все время дробящихся брызг с большой скоростью устремляется вверх, такой же объем жидкости, но уже под разрядом, устремляется вниз и увлекает за собой

воздух. Скорость движения при этом так велика, что воздух прорывается вглубь (в объем жидкости) в виде крупных пузырьков, которые, постепенно дробясь, всплывают, заполняя весь объем жидкости и делая ее как бы кипящей.

Для уяснения сущности происходящих при этом процессов на рис. 2.16, *а — е* приведена последовательность явлений, сопровождающих разряд. На рис. 2.16, *а* показан момент, когда в жидкости между электродами в искровом промежутке возникают искровой разряд и первый — основной — гидравлический удар. Зона высоких давлений имеет специфическую форму, а жидкость получает огромные ускорения во все стороны от линии разряда. Затем часть жидкости, расположенная над разрядом, под действием возникших сил вырывается из общего объема жидкости и в виде крупных брызг устремляется вверх, оставив в жидкости характерное углубление в виде чаши (рис. 2.16, *б*). Слои жидкости, расположенные под разрядом (т. е. у дна чаши), продолжают движение вниз и увлекают за собой окружающий воздух через углубляющуюся чашу. Вылетевшая вверх часть жидкости интенсивно дробится на мелкие капли. Вход в чашу начинает сжиматься под действием поверхностного натяжения жидкости (рис. 2.16, *в*). Воздух, двигающийся вниз, обгоняет жидкость, уже замедлившую свое перемещение, и в виде крупных пузырей прорывается внутрь нее. В жидкости появляются боковые и верхние перемещения, способствующие дальнейшему смыканию горловины чаши. Вылетевшая вверх жидкость продолжает свое движение, все более измельчаясь (рис. 2.16, *г*). Удлиненная чаша захлопывается, образовав кумулятивный всплеск и волнообразные движения поверхности под влиянием внутренних сил бурно двигающейся жидкости. Весь объем сосуда заполняется многочисленными дробящимися на части и всплывающими вверх пузырьками воздуха разной величины. На поверхность жидкости падает потерявшая скорость, раздробленная на капли жидкость, вылетевшая ранее из сосуда (рис. 2.16, *д*). На этом процесс заканчивается. Объем жидкости в сосуде густо насыщен воздушными пузырьками средних и малых размеров. Поверхность жидкости относительно спокойна. Падение капель жидкости сверху прекратилось (рис. 2.16, *е*).

Совокупность явлений, происходящих при осуществлении разряда под относительно небольшим слоем жидкости, и была названа «воздушной кавитацией». Возможности практического использования этого явления позволили предложить метод электрогидравлической обработки материалов при помощи воздушной кавитации, который может широко применяться для дробления и измельчения всякого рода эластичных и волокнистых материалов (бумаги, древесных остатков, резины, торфа, асбеста, тряпья, органических субстратов), мытья, эмульгирования, перемешивания, очистки мелкого литья, готовых изделий и т. п. [43, 75].

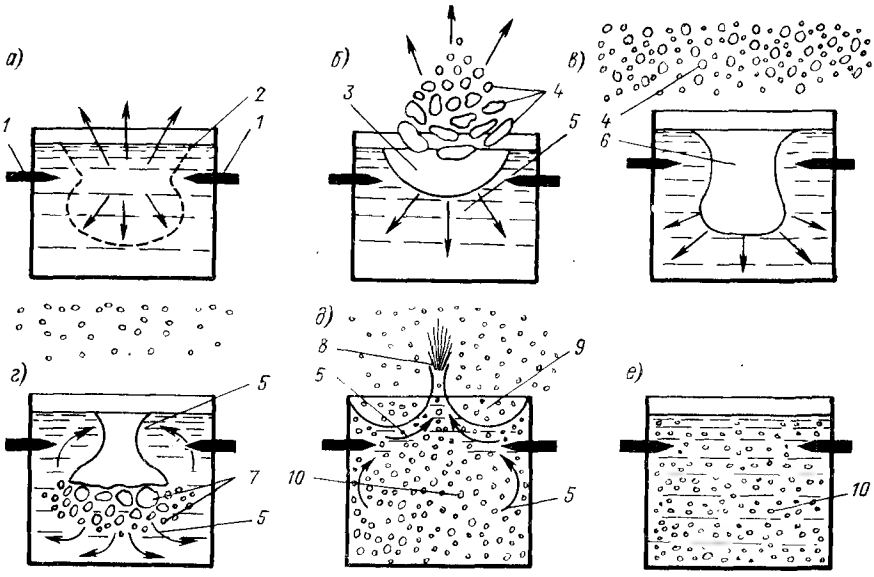


Рис. 2.16. Схема процессов при «воздушной кавитации»:
1 — электроды; *2* — контур зоны высоких давлений, *3* — чаша, образованная вылетевшей вверх частью жидкости; *4* — брызги жидкости; *5* — направление перемещения жидкости; *6* — углубляющаяся вниз чаша; *7* — прорвавшиеся вниз крупные пузырьки воздуха; *8* — кумулятивный всплеск; *9* — волнообразные движения поверхности; *10* — дробящиеся и всплывающие пузырьки воздуха

Повышение эффективности этого метода может быть достигнуто добавлением в состав жидкости песка, абразивных материалов (при очистке) или различных реактивов (при мойке).

Метод «пузырьковой кумуляции». Сущность метода «пузырьковой кумуляции» [5, 53] состоит в том, что в жидкость принудительно вводятся пузырьки какого-либо газа или пара, которые в виде полусфер оседают на разрушаемом материале, распределенном в жидкости. Под влиянием сверхвысоких давлений, возникающих в жидкости при электрогидравлических ударах, происходит мгновенное захлопывание таких осевших пузырьков. При захлопывании в силу фокусирующего действия полусфер происходит образование кумулятивных струй жидкости, направленных в сторону материала, и локальное его разрушение. Процесс этот осуществляется весьма интенсивно, охватывая активный объем, значительно превышающий объем зоны данного электрогидравлического удара. Однако пузырьки какого-либо газа или пара, вводимые в жидкость, могут быть различны по величине, а опыт показывает, что самые мелкие пузырьки практически не оседают на материале в виде необходимых нам полусфер, но держатся в жидкости вблизи материала, сохраняя свою шаровидную форму и медленно всплывая. Очень крупные пузырьки совсем не оседают на материале и быстро всплывают на поверхность. Не осевшие

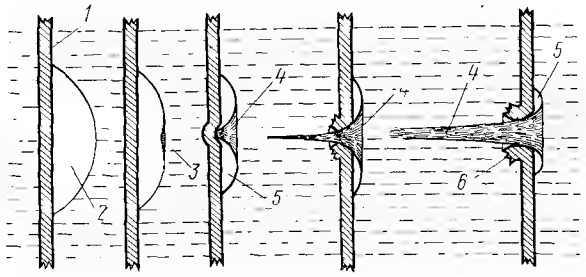


Рис. 2.17. Схема процессов возникновения кумулятивной струи при «пузырьковой кумуляции»:
1 – материал, *2* – осевший пузырек до начала сжатия; *3* — искажение формы пузырька; *4* — кумулятивная струя; *5* – образование тороидного пузырька; *6* – пробитый край отверстия в материале

на материале пузырьки не только бесполезны для осуществления процесса измельчения, но и вредны, так как, захлопываясь при электрогидравлическом ударе, они непроизводительно поглощают энергию удара. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы в жидкости возникали пузырьки только оптимального (среднего) размера, хорошо оседающие на материале в виде слегка сплющенных полусфер. Оптимальный размер пузырьков зависит от типа жидкости, газа или пара, наполняющих полость пузырька, и свойств рабочей жидкости (температуры вязкости и т. п.). Подбор оптимальных размеров пузырьков, вводимых в данную жидкость, осуществляется, например, регулированием давления подачи газа или пара, вводимого в жидкость через сетчатую трубку с калиброванными отверстиями.

Последовательные стадии процесса образования жидкой кумулятивной струи на осевшем пузырьке приведены на рис. 2.17. Пузырек, осевший на материале, под воздействием высоких давлений, возникших в жидкости от электрогидравлического удара, захлопывается, постепенно образуя жидкую кумулятивную струю, направленную в сторону материала и воздействующую на него.

Опыт показал, что пузырек воздуха объемом около 0,5 $см^3$, расположенный под слоем воды толщиной 300—400 мм, при возникновении разряда с энергией в 500 Вт·с на расстоянии около 150 мм от него способен образуемой им кумулятивной струей пробить насквозь стальную пластинку толщиной 2—3 мм. Поскольку распадающиеся после срабатывания воздушные и газовые пузырьки в дальнейшем не могут быть использованы и, как мы уже указывали, только вредят эффективности процесса, следует вводить в жидкость не газ, а пар. При этом длительность существования пузырька пара должна быть равна времени его оседания и образования кумулятивной струи, вызывающей необходимое разрушение, с тем, чтобы затем пузырек распался,

немедленно конденсировался в жидкости и исчез без вреда для дальнейшего хода процесса.

Метод «пузырьковой кумуляции» охватывает активным разрушающим воздействием значительный объем жидкости с рассеянными в ней частицами материала и поэтому особенно целесообразен для измельчения всякого рода волокнистых и пластинчатых материалов (целлюлозы, макулатуры, слюды и т. п.) [53, 75].

Отметим, что поскольку при осуществлении явления «воздушной кавитации» в жидкость прорывается значительный объем воздуха, дробящегося затем на отдельные пузырьки, то при этом также неизбежно возникают последствия, сопутствующие протеканию изложенного выше явления «пузырьковой кумуляции». Устройства для измельчения способом «пузырьковой кумуляции» будут аналогичны всем измельчающим устройствам с той лишь разницей, что где-либо в нижней части рабочей камеры должен быть размещен трубопровод, имеющий выход в корпус устройства и закрытый сеткой с калиброванными отверстиями для регулируемого непрерывного подвода газа или пара внутрь объема жидкости, находящейся в рабочей камере. Этот метод может использоваться, например, для двусторонней электрогидравлической очистки непрерывно движущегося проката в абразивной среде, очистки литья, очистки на плаву от обрастания днищ корпусов судов, бурения и т. д. [25, 41, 54, 97].

2.5. Реверсивный разряд

При работе электрогидравлического устройства в режиме «обратной полярности» (т. е. когда положительным является электрод с максимально активной поверхностью, а отрицательным – электрод, изолированный по всей его длине) конфигурация электрического поля в жидкости, определяющая характер движения в ней ионов, резко изменяется и наблюдается явление, названное нами реверсивным разрядом [3, 4, 7]. При этом стримеры разряда вместо того чтобы расти от положительного электрода к отрицательному, как это происходит при осуществлении сверхдлинного разряда, начинают расти от конца отрицательного, изолированного теперь электрода, в сторону, противоположную неизолированной пластине положительного электрода.

Визуально это выглядит так, что стримеры растут не к противолежащему электроду, а словно пятясь от него, развиваются, направляясь в объем жидкости, лежащей против этого электрода [36]. Принципиальная схема устройства для осуществления реверсивных разрядов приведена на рис. 2.18. Для пояснения сущности явления приведем описание одного из наших опытов. В ванну с окнами из органического стекла вместимостью около 1,5 м³ технической воды, допускающую осуществление в ней разрядов длиной более 1 м, опускались электроды. Один из них стерж

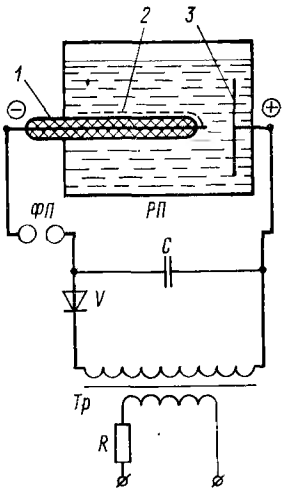


Рис. 2.18. Принципиальная схема для воспроизведения реверсивного разряда (*ФП* — формирующий искровой промежуток):
1 — изолированный отрицательный электрод; *2* — реверсивный разряд; *3* — пластина положительного электрода

невой, выполненный из бериллиевой бронзы (диаметром 4 мм), был изолирован по всей длине трубкой из вакуумной резины (толщина стенки 6 мм). Конец электрода был заточен в виде полусферы и выступал из резиновой трубки на 2 мм. Второй электрод, выполненный из алюминиевого листа (толщиной 6 мм), располагался на изоляторах на дне металлической ванны, заполненной технической водой, и имел размеры 800×600 мм. Вначале импульсы от ГИТ, собранного по обычной схеме электрогидравлических силовых установок (при $U=100$ кВ и $C=0{,}5$ мкФ), подавались на стержневой электрод, имеющий положительную полярность. Электрические искровые пробои водопроводной воды наблюдались на расстоянии между электродами до 100 см. При дальнейшем увеличении расстояния между электродами пробои прекращались и все разряды были только кистевыми. В случае полного удаления резиновой изоляции с положительного электрода получить разряд длиннее 10 см при тех же параметрах разрядного контура не удалось. Постепенное надвигание резиновой изоляции на стержень положительного электрода также постепенно увеличивало длину искрового разряда до 100 см при минимальной поверхности электрода, соприкасающейся с водой. При уменьшении поверхности отрицательного электрода до 400×300 мм с максимально изолированной поверхностью положительного электрода длина искрового разряда при тех же параметрах импульса уменьшалась до 50 см. Таким образом, с уменьшением активной (соприкасающейся с водой) поверхности положительного электрода и одновременным увеличением активной поверхности отрицательного электрода электрический разряд между электродами осуществлялся при градиентах менее 1 кВ/см.

Затем (при прочих одинаковых условиях) изменилась полярность электродов. Теперь искровой пробой наступал только в тех случаях, когда расстояние между электродами не превышало 8 см, а градиент пробоя составлял при этом более 12 кВ/см. Увеличение расстояния между электродами более чем на 8 см совершенно изменяло характер разряда. При подаче импульса тока возникал кистевой разряд в виде одного-двух стримеров, стелющихся по поверхности резиновой изоляции отрицательного электрода в сторону, обратную расположению положительного

электрода. Длина усов стримера, всегда направленных в противоположную положительному электроду сторону, возрастала по мере сближения электродов, достигая 80 см при максимальном их сближении (но не ближе 8 см).

Опыт показал, что при реверсивном разряде напряженность поля, необходимая для пробоя длинных (в несколько десятков сантиметров) промежутков, в 10—15 раз превышает напряженность поля пробоя при прямой полярности (в условиях сверхдлинного разряда) и только для очень коротких (менее 3—5 см) промежутков возвращается к обычной норме 1 кВ/см).

По нашим представлениям, эти явления могут быть обусловлены резкой асимметрией поля, вызванной применением сильно различающихся по величине активных поверхностей обоих электродов. В этом случае в жидкости между электродами возникает особая «ионная атмосфера» преимущественно одного знака, либо облегчающая (сверхдлинный разряд), либо затрудняющая (реверсивный разряд) прорастание стримеров. Поэтому если поменять местами полюсы в том же устройстве с развитым отрицательным и изолированным положительным электродами, то это приводит к изменению всех процессов в межэлектродном пространстве. В самом деле, если раньше развитая поверхность отрицательного электрода позволяла зарядам легко пополнять содержание в ней ионов OH^-, то теперь развитая поверхность положительного электрода, наоборот, будет благоприятствовать увеличению количества положительных ионов H^+ и выводить из обращения отрицательные ионы OH^-, которым теперь будет некуда разряжаться, ибо из такой огромной поверхности стримеры расти не станут, так как градиент напряжения у этой поверхности слишком мал.

В то же время у отрицательного электрода, почти полностью изолированного, будет весьма затруднено образование отрицательных ионов OH^-, а множество быстрых положительных ионов H^+ почти полностью преградят путь ионам OH^- к положительному электроду. Таким образом, «ионная атмосфера» из ионов H^+, препятствуя прорастанию стримеров к противоположному по знаку электроду, определяет появление своеобразного явления реверсивного или «пятящегося» разряда. Реверсивный разряд развивается в виде одно-, двухканальной кисти, сильноразветвленной на конце, и движется в обратную от острия электрода сторону, по границе раздела изоляция жидкость. Он не зависит от электромагнитного поля электрода, связан только с поверхностью его изоляции, следует любым ее изгибам и очень легко переходит с ее поверхности на поверхность любого другого изолятора, прижатого сбоку к изоляции электрода.

По нашим представлениям, развитие разряда в этом направлении вызвано тем, что граница раздела изоляция—жидкость (как и всякий пограничный слой) имеет отличную от окружающей жидкости ионную структуру (в данном случае состоящую в основ-

ном из ионов OH^-). Тогда в полном соответствии с ранее высказанными положениями из объема жидкости, расположенного за электродами и имеющего «ионную атмосферу», состоящую в основном также из ионов OH^-, к концу электрода, по жидкости (в пограничном слое его изоляции) начинают расти лавины стримеров, достигающие затем его острия и визуально создающие впечатление выхода кисти из острия электрода.

Объяснение этого явления действием лавины электронов, выходящих из острия и нейтрализующих ионы H^+, кажется нам малоубедительным, поскольку подобная лавина с большей вероятностью могла бы развиваться между электродами, где для этого существуют, казалось бы, более благоприятные условия. Однако выход электронов, нейтрализующих ионы H^+, вполне допустим на небольших расстояниях не только от острия, но и от канала стримера, когда он достигает острия.

Таким образом, в начальный период лавина стримеров, обусловленная срывом электронов с ионов OH^-, растет из жидкости к острию электрода, причем электроны, как обычно, движутся в обратном направлении, а после смыкания стримера с острием электроны с острия заполняют и насыщают канал и частично расходуются в его зоне на нейтрализацию ионов H^+. Этот стример имеет максимальную «толщину» там, где градиент поля и концентрация ионов OH^- выше, т. е. у переднего конца отрицательного электрода, и многократно ветвится на другом конце, в жидкости. Стример постепенно отходит от изоляции по мере удаления его от переднего конца отрицательного электрода. Исходя из характера протекания этого явления, можно утверждать, что концентрация ионов OH^- в пограничном слое раздела изоляция - жидкость достаточно велика и обусловлена особыми свойствами этого пограничного слоя.

По мере сближения электродов между собой длина реверсивного разряда увеличивается, доходя при 100 кВ до 50 -80 см. Это объясняется тем, что при сближении электродов изолированный отрицательный электрод как бы все глубже погружается в область «ионной атмосферы», обусловленной ионами H^+, а область, заполненная ионами OH^-, удаляется от острия электрода. При дальнейшем сближении электродов на расстояние, меньшее 1/10 первоначального, реверсивный разряд сменяется нормальным искровым пробоем через жидкость между электродами, при этом градиент пробоя резко возрастает и составляет около 10—15 кВ/см. Это явление может быть объяснено тем, что примененная асимметрия поля не создает «ионной атмосферы» из одних только ионов H^+ или OH^-, а создает смешанную, лишь в определенной степени «обогащенную» одним из ионов. В соответствии со степенью этого обогащения, располагая, например, только ионами OH^-, можно получить лишь небольшой стример при очень больших градиентах (из-за влияния «ионной атмосферы» противоположного знака, что и имеет место в действительности).

Из этого следует, что примененная асимметрия поля позволяет примерно в 10 раз изменять относительную насыщенность ионами H^+ или OH^- объема жидкости между электродами. За пределами этого объема вероятно «обогащение» ионами другого знака, что и подтверждается опытом.

С дальнейшим уменьшением расстояния между электродами градиент пробоя очень быстро падает и для очень коротких (до 3 см) промежутков составляет величину, характерную для сверхдлинного разряда. Реверсивный разряд становится интенсивнее с увеличением энергии импульса и резко ослабевает с увеличением концентрации ионов. Интенсивность разряда возрастает и при сближении электродов до указанного выше предела, за которым он переходит в обычный искровой пробой.

В зависимости от рода жидкости и концентрации в ней ионов зачастую возникают такие условия, когда длина прямого и реверсивного разрядов (имеется в виду только чисто искровой пробой) одинакова. Это свидетельствует о том, что количественный сдвиг концентрации благоприятствующих сверхдлинному разряду ионов при помощи указанной выше асимметрии поля не всегда удается осуществить. Иногда реверсивный разряд бывает даже длиннее прямого. Этот случай, видимо, следует объяснить соответствующим влиянием ионов других веществ, находящихся в данной жидкости.

С увеличением удельной проводимости жидкости сдвиг ионной концентрации в объеме жидкости между электродами чрезвычайно затрудняется. Взаимодействие большого числа ионов между собой исключает возможность достаточного обогащения этой зоны ионами одного знака, и поэтому концентрация ионов другого знака оказывается по-прежнему столь большой, что характерные признаки, присущие сверхдлинному и реверсивному разрядам, ослабевают или даже не возникают. Кроме того, с повышением концентрации ионов в жидкости резко возрастают потери на проводимость, а это оказывает существенное влияние на градиенты напряженности поля вблизи электродов и в объеме жидкости между ними, делая невозможным прорастание стримеров на достаточно большие расстояния, в то время как вся энергия импульса поглощается вблизи электродов. В зависимости от знака иона, определяющего основную проводимость данного электролита, реверсивный разряд может возникать и при другой полярности электродов.

На практике реверсивный разряд может быть использован при создании принципиально нового оборудования для силовых электрогидравлических установок, как например: высоковольтных выключателей постоянного тока большой мощности; высокочастотных выпрямляющих устройств с водяным вакуумом; импульсных «непробиваемых» высоковольтных (высокочастотных) конденсаторных устройств с водяной изоляцией; устройств для электрохимического синтеза и катализа и т. д.

Реверсивный разряд также используют при бурении электрогидравлическим буром «грязного забоя», где конфигурация полей и направление движения стримеров, возникающих при реверсивном разряде, благоприятствуют процессу бурения, как бы «отжимая» разряд ко дну забоя [41]. В ряде случаев (особенно когда заданная конструктивными условиями длина искрового разряда мала и не превышает 10—30 мм), например, для повышения стойкости изоляции электрода также целесообразно работать в режиме обратной полярности [4].

Реверсивный разряд, создающий в объеме между электродами (например, в воде) преобладание положительных ионов H^+ и резко выраженную кислотную реакцию, может иметь большое практическое значение при осуществлении направленных химических реакций.

Метод управления потерями. Этот метод основан на использовании об-

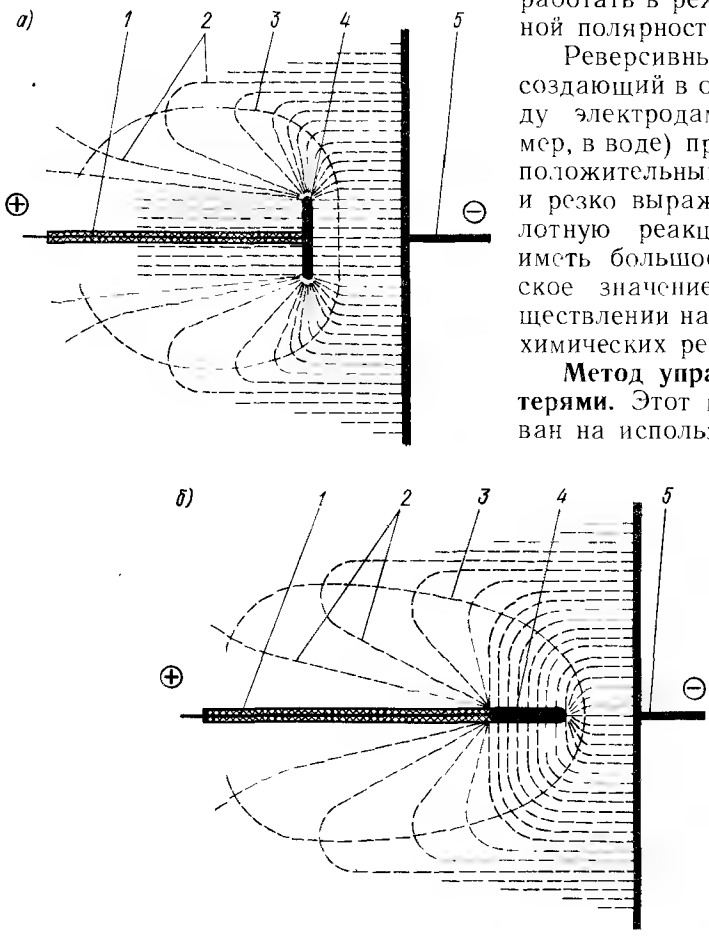


Рис. 2.19. Схема электрического поля в жидкости при использовании пластины с положительной полярностью: *а*, *б* — параллельной и перпендикуляр ной к плоскости отрицательного электрода; *1* — положительный электрод; *2* — силовые линии поля; *3* — эквипотенциальные поверхности, *4* — пластина — элемент с положительной полярностью; *5* — отрицатель ный электрод

наруженных закономерностей возникновения и развития реверсивных разрядов. Известно, что электрические потери, неизбежные в электротехнических устройствах, можно уменьшить, если учесть специфику их возникновения.

Опытным путем было установлено [56] влияние положения металлической пластины, помещенной на стержневой положительный электрод, на длину и форму разрядов, развивающихся с этого электрода. Оказалось, что приближение пластины к концу положительного электрода уменьшает длину искры или стримеров кисти при кистевом разряде, а удаление ее увеличивает их. Еще более значительно влияет на параметры искры поворот пластины относительно вертикальной оси без изменения ее положения относительно стержня положительного электрода. При этом существенное значение имеет угол поворота пластины относительно плоскости отрицательного электрода. Электрические потери становились максимальными в том случае, когда плоскости обеих пластин были параллельны друг другу, и минимальными, когда они были перпендикулярны. Поэтому для уменьшения электрических потерь при конструировании различных электрогидравлических устройств, элементы конструкций которых должны быть выполнены с большой активной поверхностью положительного электрода следует максимально уменьшать активную поверхность положительного электрода; располагать эту поверхность перпендикулярно к поверхности отрицательного электрода; при заданном напряжении работать только на оптимальной для данного случая длине рабочего искрового промежутка.

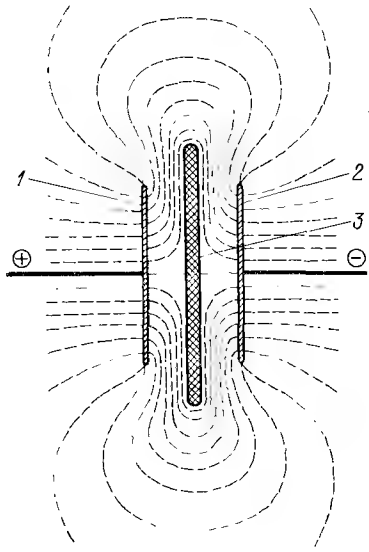


Рис. 2.20. Схема электрического поля в жидкости при экранировании электродов диэлектриком: *1*, *2* – пластины положительного и отрицательного электродов; *3* экран — пластина диэлектрика

На рис. 2.19, *а* показано направление силовых линий электрического поля для положительного электрода, снабженного пластиной, параллельной плоскости отрицательного электрода, при отрицательном электроде с большой активной поверхностью, а на рис. 2.19, *б* — для положительного электрода, снабженного пластиной, размещенной перпендикулярно к плоскости отрицательного электрода. Из сопоставления этих двух рисунков видно, что взаимное расположение пластин электродов во втором случае действительно приводит к уменьшению потерь. На рис. 2.20 показано направление силовых линий электрического поля

при экранировании положительного электрода диэлектрической пластиной.

Выбор с помощью предложенного метода оптимального варианта расположения электродов обеспечивает уменьшение потерь в электрогидравлических устройствах, что приводит при заданной мощности источника энергии к увеличению длины искрового разряда, повышению производительности этих устройств. Так, в конструкциях буров кольцевого забоя, имеющих развитую поверхность положительного электрода, необходимо предусматривать выполнение этого электрода в виде узкого кольца, отделенного от основной трубы кольцом диэлектрика. Уменьшить потери можно и при электрическом подсоединении к стержневому положительному электроду дополнительной металлической пластины, поворачивающейся вокруг параллельной электроду подвижной оси [4, 6, 56].

2.6. Импульсные диэлектрики

Впервые вопрос о возможности создания импульсных диэлектриков и перспективах их использования в технике был поставлен в 1954 г. [3, 4, 6, 7, 36, 41]. Известно, что при наложении на ионопроводящую жидкость электрического поля ионы начинают двигаться в поле сообразно своим зарядам со скоростями, зависящими от их массы, степени гидратации, свойств жидкости и напряженности электрического поля. При этом электрическое поле может быть создано в жидкости не только погружением в нее электродов, но и внешними электродами, не связанными прямым контактом с жидкостью.

При воздействии на жидкость импульсного электрического поля возможно такое состояние, когда тяжелые ионы практически не успеют начать движение, а процесс воздействия на них окажется уже законченным. Поэтому многие ионопроводящие жидкости в таких быстро возникающих и быстро исчезающих импульсных полях по существу будут вести себя как диэлектрики, и тем лучшими диэлектриками они будут, чем короче будет интервал времени приложения импульса напряженности поля.

Поскольку сообщение ионопроводящим жидкостям свойств, присущих только жидкостям-диэлектрикам, осуществляется приложением импульсных напряжений, то рационально ввести термин, характеризующий особые свойства подобного рода жидкостей, назвав их импульсными диэлектриками.

Перспективы практического использования импульсных диэлектриков выдвинули задачу повышения их диэлектрических свойств, так как на практике важно не только превратить данную ионопроводящую жидкость в импульсный диэлектрик, но и успеть использовать ее новые положительные свойства, возникающие при этом.

Теоретические соображения по поводу возникновения и протекания сверхдлинного и реверсивного разрядов, основанные

на поведении в жидкости положительных и отрицательных ионов, позволили предположить, что для сообщения проводящим жидкостям высоких диэлектрических свойств следует создать в них условия, позволяющие управлять поведением ионов. Процесс движения ионов осложняется тем, что независимо от электрического поля в жидкости идет процесс рекомбинации ионов, состоящий в непрерывной нейтрализации - исчезновении ионов в одной точке объема жидкости и возникновении их в другой.

Перемещение ионов внешне выглядит как процесс медленного «просачивания» или «просеивания» противоположно движущихся ионов через два своеобразных «сита»: неподвижное «сито» неионизированных молекул данной жидкости и подвижное «сито», образованное потоком противоположно заряженных ионов, движущихся навстречу друг другу. Эти движения совершаются по сути дела без «свободного пробега» между соударениями, путем постоянных электрических контактов заряженного иона с электрическими полями одноименно и противоположно заряженных ионов. Подобное движение ионов можно представить как процесс «раздвигания» движущимся ионом движущихся ему навстречу ионов другого знака и «неподвижных» нейтральных молекул.

При импульсном воздействии двух соприкасающихся упругих или относительно упругих объектов друг на друга резко уменьшаются возможности их взаимного движения, наблюдается явление взаимного удерживания на месте — взаимоторможения. Когда электрический импульс, вызвавший появление этого явления, будет снят, то оба иона за счет сил упругости должны оттолкнуться друг от друга и разойтись в противоположные стороны. А поскольку всякое перемещение иона есть ионный ток, то внешне указанный выше процесс взаимоотталкивания будет выглядеть как появление в жидкости короткого импульсного тока противоположного направления. Величина и направление этого тока могут быть зарегистрированы.

Таким образом, при импульсном воздействии внешнего электрического поля на ионопроводящую жидкость в общем движении ионов, вызванном его приложением, станет наблюдаться явление взаимоторможения, приводящее к дополнительному усложнению условий перемещения ионов в жидкости. В этом новом процессе общая масса практически остановившихся ионов станет тем более неподвижной, чем больше степень ионизации, круче фронт импульса приложенного напряжения и чем стабильнее его нарастание, протекание и спад.

Однако очевидно, что число ионов в единице объема жидкости будет зависеть не только от степени ее ионизации, но и от величины проходящего по ней тока. Число противоположно движущихся ионов будет в значительной степени влиять на скорость их взаимного перемещения, поэтому увеличение силы тока будет повышать добротность жидкости как импульсного диэлектрика.

Иное дело — степень ионизации. Хотя повышение ее значения, казалось бы, и желательно, ибо число ионов в единице объема жидкости при этом растет, но тем не менее, учитывая большие потери энергии, возникающие по этой причине в предразрядный период, следует с осторожностью рекомендовать ее увеличение выше некоторого предела определяемого упомянутыми выше условиями.

Состояние взаимоторможения ионов сохраняется стабильным, а ионы остаются практически неподвижными все время, пока сохраняется неизменность крутизны фронта нарастания или спада импульса напряженности поля. Малейшие изменения нарастания или спада крутизны фронта импульса будут изменять условия процесса взаимоторможения и неподвижности ионов, изменять ту стабильность, которая установилась, и вызывать перемещение ионов относительно друг друга. Следовательно, стабильность нарастания или спада крутизны фронта импульса напряженности поля является определяющим фактором в сохранении данной жидкостью свойств импульсного диэлектрика, приобретенных ею при импульсном приложении поля.

Если ток - это фактор, определяющий количество ионов, участвующих в процессе взаимного перемещения, то напряженность поля - фактор, определяющий энергию и скорость перемещения этих ионов. Крутизна фронта импульса тока определяется скоростью вступления в процесс общего перемещения все новых и новых ионов. Крутизна фронта импульса напряженности поля определяет скорость сообщения этим ионам дополнительной энергии, определяет изменение скорости их взаимного перемещения. Поэтому можно сделать вывод, что если крутизну фронта импульсов тока и напряжения согласовать, то средняя энергия, приходящаяся на один заряд - ион, может остаться постоянной. Другими словами, по мере увеличения количества вступающих в процесс движения ионов одновременно и равномерно может увеличиваться (или даже уменьшаться) энергия, приходящаяся на один заряд ион. Таким образом, условия, вызывающие явление самоторможения, превратившие данную жидкость в импульсный диэлектрик, могут оставаться стабильными сколь угодно долго, стоит лишь обеспечить условия этой стабильности.

Под термином «самоторможение» следует понимать длительный относительный покой двух или нескольких ионов, тесно контактирующих своими силовыми электрическими полями с другими ионами и пребывающих в состоянии относительного покоя строго определенное некоторыми условиями время. Этими условиями являются броуновское движение, конвекция и энергия электрического поля, действующего на ионы (ибо можно допустить существование и таких полей, под влиянием сил которых ионы просто «раздавят» друг друга, а жидкость превратится при этом в какое-то новое вещество). Этот случай представляет интерес при изучении явлений сверхмощного импульсного электролиза, осуществляемого при сверхвысоких напряженностях поля.

При движении в жидкости происходит торможение ионов за счет сопротивления движению, аналогичного трению, за счет упругих столкновений, приводящих к потере скорости ионов, и неупругих столкновений (явление «взаимоудержания»), приводящих к временной остановке движения ионов, а также за счет инерционных потерь скорости при изменениях направления движения ионов. Можно предположить также, что тяжелые, малоподвижные ионы при своем движении в электрическом поле перемещаются относительно прямолинейно, тогда как легкие, подвижные ионы движутся по криволинейным траекториям, «огибая» тяжелые ионы. При прямом столкновении тяжелого и легкого ионов из-за большой разницы их линейных размеров возможность «огибания» легким ионом более тяжелого становится затруднительной, в силу чего явление взаимоторможения облегчается.

Специфические свойства геля, которые позволяют не только резко уменьшать скорости движения ионов, но и полностью их затормаживать (например, при повышении объемного содержания или изменении структуры или свойств геля), представляют большой интерес для практического использования импульсных диэлектриков. Большое многообразие видов, свойств и структур гелей позволяет использовать их очень широко.

Ионы в гелях движутся подобно ионам, проходящим через сетку сверхтонких капилляров. При этом их скорости уменьшаются с уменьшением диаметра и под влиянием свойств поверхности капилляров. Допустимо предположение о возможности полной «закупорки» отверстия капилляра ионным «тромбом», состоящим из одного или нескольких однотипных ионов, и поэтому о полном прекращении перемещения по капилляру всех других ионов.

Таким образом, использование гелей наилучшим образом будет способствовать торможению ионов, поскольку поры гелей практически соответствуют отверстиям капилляров минимально возможного диаметра.

Способность гелей тормозить движение ионов хорошо иллюстрирует следующий опыт. На электроды, выполненные в соответствии с принципом получения сверхдлинного разряда и размещенные в ванне, заполненной водным гелем желатина, подавалось импульсное напряжение (U — 50 кВ, C = 0,1 мкФ). При расстоянии между электродами, равном 5,0 см, на прямой полярности (положительный электрод изолирован по всей длине, кроме переднего края) искрового разряда не возникало. Были заметны слабые стримеры длиной около 0,5—0,8 см у положительного электрода. Искровой пробой наступил только при сближении электродов на расстояние до 1,0 см и градиенте около 50 кВ/см. После того как гель полностью распался, искровой пробой наступал уже при расстоянии между электродами до 25 см и градиенте около 2 кВ см.

При перемене полярности искровой пробой не наступал при расстоянии между электродами 0,5 см, стример реверсивного

разряда развивался от конца отрицательного электрода в противоположную положительному электроду сторону на расстояние до 5,0 см. В полностью распавшемся геле пробой наступал при расстоянии между электродами, равном 1 см, или одновременном реверсивном разряде длиной до 20 см. Очевидно, что при достаточном содержании геля любой ион, начиная с самого тяжелого, может быть полностью заторможен в порах геля и проводимость геля в соответствии с законом Кольрауша станет обеспечиваться уже другими ионами. Кроме того, необходимо отметить, что характер движения ионов в порах геля и вблизи них имеет много общего с характером движения ионов около острия электрода, и это дает возможность по нашему желанию повышать содержание ионов одного знака в заданном участке объема геля. В частности, имея дело с водной основой геля и затормозив, например, ион OH^-, можно либо резко повысить в каком-то определенном объеме концентрацию этих ионов в порах геля и вблизи них, либо, наоборот, резко повысить в другом объеме концентрацию ионов H^+ и, буквально «забив» ими все поры геля, создать около пор изолирующую эти поры атмосферу положительных ионов. В результате можно получить относительно устойчивые «скопления» ионов одного знака в локальных объемах геля.

После разделения этих временно связанных объемов в них окажется сосредоточенным объемный заряд какого-либо одного знака, а это при соединении разноименных объемов проводником приведет к последующему выравниванию зарядов, т. е. к появлению тока в проводнике, соединяющем эти объемы. Таким образом, устройство для реализации подобной задачи приобретет все свойства гальванического элемента и позволит получить новый вид аккумуляторов - гелевый аккумулятор, а также даст в руки исследователей метод разделения ионов в жидкостях-гелях. Отметим, что хотя все гели обладают способностью более или менее быстро распадаться и терять свои первоначальные свойства, тем не менее подбором гелей и стабилизацией их свойств можно сохранить гели от распада в течение заданного времени.

Именно поэтому использование диэлектрических свойств, возникающих в импульсных полях, особенно интересно и перспективно применительно к гелям. Используя особенности гелей, представляется возможным управлять движением ионов у обоих электродов, добиваясь нужного эффекта.

Так, для создания импульсного конденсатора следует обеспечить высокую концентрацию положительных ионов H^+ у его рабочих поверхностей, затормозив движение отрицательных ионов OH^- или удалив их как можно дальше от этих поверхностей [36]. При этом «облако» положительных ионов H^+, плотно окружившее заданный электрод (рабочую поверхность конденсатора), создаст вокруг нее идеальную непробиваемую «самоизоляцию».

Следует указать, что если торможением ионов в геле можно не допустить тот или иной ион к определенному электроду и тем

самым создать возле него избыток или недостаток других ионов, то на этом возможности этого явления по существу и заканчиваются. Однако при специальном формировании конфигурации силовых линий электрического поля можно также добиться ряда положительных результатов, например, не допустить роста стримеров в заданном направлении, исключить возможность опасной концентрации ионов любого знака в заданном объеме рабочей камеры и т. д. Все эти возможности следует использовать при проектировании различных типов электрогидравлических устройств.

Поскольку условием возникновения и существования импульсных диэлектриков является наличие ионов, то не только жидкости, но при определенных условиях и газы, и твердые тела (и даже плазма) могут становиться импульсными диэлектриками. Это обстоятельство значительно расширяет возможности их применения. Так, возможно создание как высоко-, так и низкотемпературных вакуумных и жидкостных устройств, работающих при обычных температурах. Кроме этого, используя указанные свойства гелей, можно создать устройства типа диодов, триодов и других многоэлектродных устройств с управляемыми электродами для использования их в радиотехнике и электронике. Однако наиболее перспективными, по нашему мнению, будут устройства, работающие на переходных или смешанных средах: твердо-жидких (типа геля, глины), жидкостно-газовых (типа пены) или твердо-газовых (типа пыли).

По нашим представлениям, электрические процессы, происходящие в нервных клетках живых организмов, протекают с использованием принципов импульсной электрохимии и особенно принципов работы импульсных диэлектриков. Для практического использования импульсных диэлектриков необходимо также учитывать, что электрические потери в импульсных диэлектриках определяют практическую ценность их как диэлектриков, обусловливаются прежде всего электропроводностью их среды и уменьшаются вместе с уменьшением электропроводности.

Роль каждого вида ионов в импульсных диэлектриках строго определена и локальна. Одни из них, например ионы OH^-, определяют рост стримеров, например, при реализации сверхдлинного или реверсивного разряда. Другие, например ионы H^+, полезны для целей создания надежной изоляции от пробоя. В то же время ион H^+ определяет потери на проводимость в силу его высокой подвижности, и для уменьшения этих потерь необходимо всемерно уменьшать активную поверхность положительного электрода, сохраняя, однако, ионы и ионную проводимость, т. е. сохраняя потери, ибо без ионов, а следовательно, и без какой-то минимально необходимой ионной проводимости импульсные диэлектрики невозможны. Но, заменяя электропроводность одних ионов электропроводностью других, можно свести эти потери к минимуму и получить необходимый результат.

Таким образом, уменьшение проводимости среды импульсного диэлектрика и ее сохранение на необходимом уровне может осуществляться различными способами: полным или частичным торможением содержащихся в среде ионов; исключением одного или нескольких ионов из общего процесса проводимости; созданием необходимой концентрации опеределенных ионов в заданной части рабочего объема. Наиболее рационально одновременное использование всех указанных способов.

Также необходимо учитывать, что потери на проводимость оказываются минимальными при импульсном приложении электрического поля и, казалось бы, должны уменьшаться и далее — с уменьшением длительности импульса и увеличением его крутизны. Однако это не совсем так. Специфические свойства ионов заставляют предполагать, что, хотя потери и уменьшаются с увеличением крутизны и уменьшением длительности импульса, но основным фактором, определяющим потери в импульсных диэлектриках, будет параметр, характеризующий стабильность нарастания или спада крутизны фронта импульса, создавшего поле.

В частности, именно по этой причине проводимость жидкости для постоянного тока меньше, чем для переменного, так как потери на проводимость будут в нем меньше по сравнению с переменным, где спад и нарастание поля крайне нестабильны. Подобно тому, как вибрация способствует быстрому уплотнению гравия в бетоне или быстрому прохождению любого материала сквозь сито при просеивании, так и отсутствие «монотонности» (стабильности) крутизны спада и нарастания переменного тока подобно вибратору способствует тому, что ионы значительно быстрее «просеиваются» друг через друга при движении к электродам.

Отсюда следует, что потери будут оставаться стабильными до тех пор, пока будет сохраняться стабильность нарастания или спада переменного тока, пока будет оставаться неизменной крутизна нарастания или спада фронта импульса, создавшего поле. Это вовсе не означает, что импульсный диэлектрик должен использоваться все это время. Напротив, стабильность состояния импульсного диэлектрика, обеспечивающая его идеальную работу в течение длительного времени, может сохраниться и также успешно использоваться в любой период этого времени.

Все изложенное позволяет рекомендовать обычную воду для практического использования ее в качестве материала импульсного диэлектрика в устройствах, питаемых импульсами длительностью 10^{-4}–10^{-3} с и короче [36, 41]. При этом потери будут уменьшаться с увеличением крутизны фронта импульса. Потери будут максимальными с приближением крутизны фронта к импульсу практически нулевой амплитуды, а минимальными — с приближением крутизны к импульсу бесконечно крутой амплитуды. Отсюда следует, что потери будут минимальными и на тех участках кривой импульса, где нарастание или спад происходят линейно, без флуктуаций, и что в целях сохранения высоких качеств

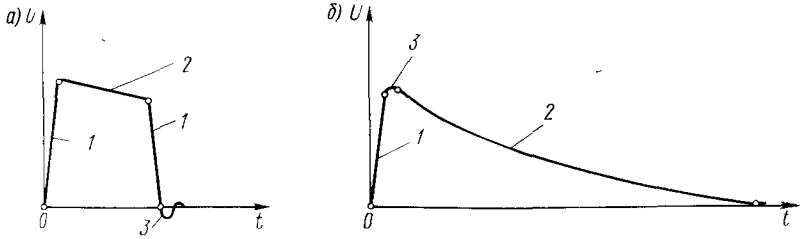


Рис. 2.21. Схема участков потерь для импульса напряжения при работе на прямой полярности (*а*) и на обратной полярности (*б*):
1 — участки наименьших потерь; *2* — участок несколько бо́льших потерь; *3* — участок максимальных потерь

импульсного диэлектрика следует обеспечивать, кроме прочих, и это условие.

На рис. 2.21, *а* приведена схема импульса напряжения при работе на прямой полярности, на которой показаны те участки, где потери могут быть минимальными и где они вынужденно максимальны, а на рис. 2.21, б — аналогичная схема для случая работы на обратной полярности для тех же параметров длины искры, напряжения и емкости. Из сопоставления этих двух схем следует, что при работе на одинаковых параметрах импульса, но на обратной полярности жидкость, как импульсный диэлектрик, «работает» более эффективно и экономично и оказывается способной во много раз дольше сохранять свойства импульсного диэлектрика, чем в случае работы устройств на прямой полярности.

Магнитное поле при реверсивном разряде имеет свои особенности. Из сравнения рис. 2.21, *а* и 2.21, *б* следует, что зависимости тока и напряжения реверсивного разряда и разряда при работе на прямой полярности совершенно различны и по форме кривых и по характеру нарастания и спада. Однако зависимости на рис. 2.21, *б* соответствуют реверсивному разряду «в чистом виде», т. е. когда разряд возникает при максимально изолированном отрицательном электроде и очень сильно развитой активной поверхности пластины положительного электрода. По мере увеличения площади отрицательного и уменьшения площади положительного электрода кривые тока и напряжения реверсивного разряда будут все более походить на кривые тока и напряжения разряда при работе на прямой полярности, приведенные на рис. 2.21, *а*.

Таким образом, и на реверсивном разряде работа всех устройств, использующих импульсные диэлектрики, будет происходить в условиях, когда вид и форма кривых тока и напряжения будут очень близки к их канонической форме при обычном разряде на прямой полярности.

Все вышеизложенное послужило основой для создания импульсных конденсаторов, кабелей, выпрямителей, вентилей, диодов, выключателей импульсных токов, принципиальные схемы которых были предложены еще в начале 50-х годов.

Глава 3

Электрические схемы и комплектующее оборудование электрогидравлических установок

3.1. Электрические схемы генераторов импульсов тока электрогидравлических устройств

Генератор импульсов тока (ГИТ) предназначен для формирования многократно повторяющихся импульсов тока, воспроизводящих электрогидравлический эффект. Принципиальные схемы ГИТ были предложены еще в 1950 х годах [4, 7, 9] и за истекшие годы не претерпели существенных изменений, однако значительно усовершенствовались их комплектующее оборудование и уровень автоматизации. Современные ГИТ предназначены для работы в широком диапазоне напряжения (5—100 кВ), емкости конденсатора (0,1—10 000 мкФ), запасенной энергии накопителя ($10-10^6$ Дж), частоты следования импульсов (0,1—100 Гц). Приведенные параметры охватывают большую часть режимов, в которых работают электрогидравлические установки различного назначения.

Выбор схемы ГИТ определяется в соответствии с назначением конкретных электрогидравлических устройств. Каждая схема генератора включает в себя следующие основные блоки: блок питания — трансформатор с выпрямителем; накопитель энергии конденсатор; коммутирующее устройство формирующий (воздушный) промежуток; нагрузка — рабочий искровой промежуток. Кроме того, схемы ГИТ включают в себя токоограничивающий элемент (это может быть сопротивление, емкость, индуктивность или их комбинированные сочетания). В схемах ГИТ может быть несколько формирующих и рабочих искровых промежутков и накопителей энергии. Питание ГИТ осуществляется, как правило, от сети переменного тока промышленной частоты и напряжения.

ГИТ работает следующим образом. Электрическая энергия через токоограничивающий элемент и блок питания поступает в накопитель энергии конденсатор. Запасенная в конденсаторе энергия с помощью коммутирующего устройства — воздушного формирующего промежутка — импульсно передается на рабочий промежуток в жидкости (или другой среде), на котором происходит выделение электрической энергии накопителя, в результате

чего возникает электрогидравлический удар. При этом форма и длительность импульса тока, проходящего по разрядной цепи ГИТ, зависят как от параметров зарядного контура, так и от параметров разрядного контура, включая и рабочий искровой промежуток. Если для одиночных импульсов специальных ГИТ параметры цепи зарядного контура (блока питания) не оказывают существенного влияния на общие энергетические показатели электрогидравлических установок различного назначения, то в промышленных ГИТ КПД зарядного контура существенно влияет на КПД электрогидравлической установки.

Использование в схемах ГИТ реактивных токоограничивающих элементов обусловлено их свойством накапливать и затем отдавать энергию в электрическую цепь, что в конечном счете повышает КПД.

Электрический КПД зарядного контура простой и надежной в эксплуатации схемы ГИТ с ограничивающим активным зарядным сопротивлением (рис. 3.1, *а*) весьма низок (30 -35 %), так как заряд конденсаторов осуществляется в ней пульсирующими напряжением и током. Введением в схему специальных регуляторов напряжения (магнитного усилителя, дросселя насыщения) можно добиться линейного изменения вольт-амперной характеристики заряда емкостного накопителя и тем самым создать условия, при которых потери энергии в зарядной цепи будут минимальны, а общий КПД ГИТ может быть доведен до 90 % [4].

Для увеличения общей мощности при использовании простейшей схемы ГИТ кроме возможного применения более мощного трансформатора целесообразно иногда использовать ГИТ, имеющий три однофазных трансформатора, первичные цепи которых соединены «звездой» или «треугольником» и питаются от трехфазной сети. Напряжение с их вторичных обмоток подается на отдельные конденсаторы, которые работают через вращающийся формирующий промежуток на один общий рабочий искровой промежуток в жидкости (рис. 3.1, *б*) [4].

При проектировании и разработке ГИТ электрогидравлических установок значительный интерес представляет использование резонансного режима заряда емкостного накопителя от источника переменного тока без выпрямителя. Общий электрический КПД резонансных схем очень высок (до 95 %), а при их использовании происходит автоматическое значительное повышение рабочего напряжения. Резонансные схемы целесообразно использовать при работе на больших частотах (до 100 Гц), но для этого требуются специальные конденсаторы, предназначенные для работы на переменном токе. При использовании этих схем необходимо соблюдать известное условие резонанса

$$\omega = 1/\sqrt{LC},$$

где ω — частота вынуждающей ЭДС; L — индуктивность контура; C — емкость контура.

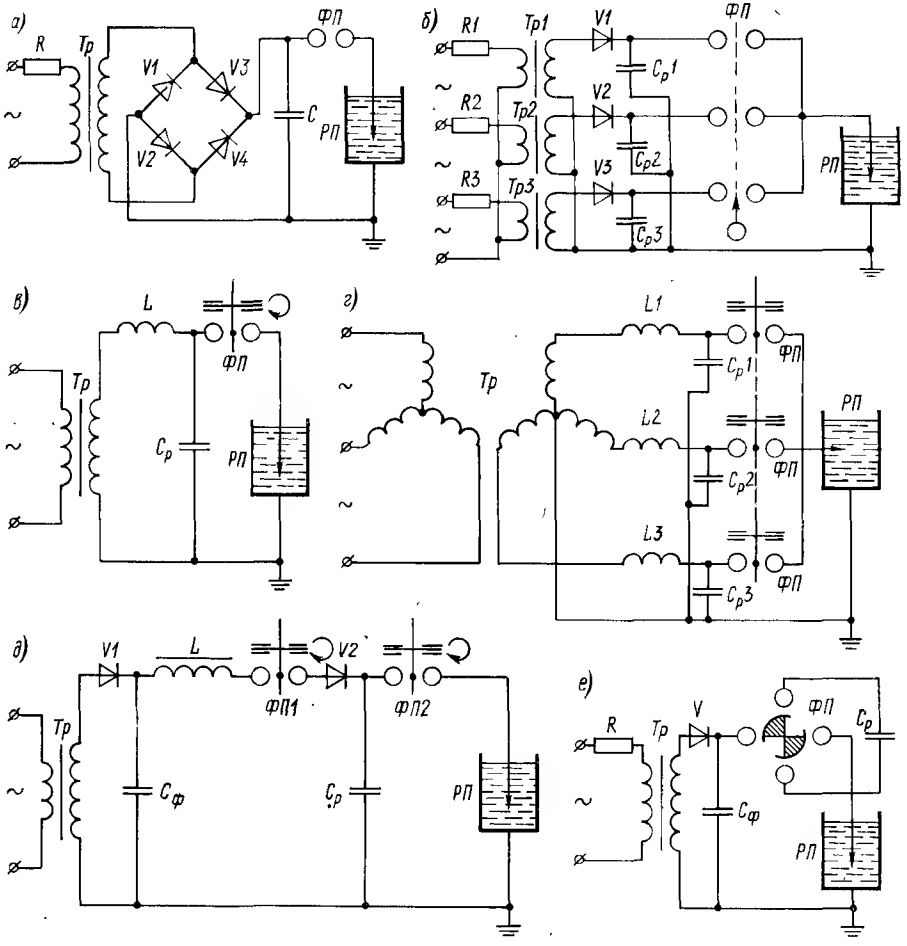


Рис. 3.1. Принципиальные электрические схемы ГИТ электрогидравлических установок (*Тр1 Тр3* — трансформаторы; *R1—R3* — сопротивления в цепи сетевого питания; *V1—V4* — выпрямители; $C_р$ — рабочий конденсатор; $C_ф$ — фильтровый конденсатор; *L1—L3* — индуктивность (дроссели); *ФП, ФП1, ФП2* — формирующие промежутки; *РП* — рабочий искровой промежуток

Однофазный резонансный ГИТ (рис. 3.1, *в*) может иметь общий электрический КПД, превышающий 90 %. ГИТ позволяет получать стабильную частоту чередования разрядов, оптимально равную либо однократной, либо двукратной частоте питающего тока (т. е. 50 и 100 Гц соответственно) при питании током промышленной частоты. Применение схемы наиболее рационально при мощности питающего трансформатора 15—30 кВт. В разрядный контур схемы вводится синхронизатор — воздушный формирующий промежуток, между шарами которого расположен вра-

щающийся диск с контактом, вызывающим срабатывание формирующего промежутка при проходе контакта между шарами. При этом вращение диска синхронизируется с моментами пиков напряжения [4].

Схема трехфазного резонансного ГИТ (рис. 3.1,*г*) включает в себя трехфазный повышающий трансформатор, каждая обмотка на высокой стороне которого работает как однофазная резонансная схема на один общий для всех или на три самостоятельных рабочих искровых промежутка при общем синхронизаторе на три формирующих промежутка. Эта схема позволяет получать частоту чередования разрядов, равную трехкратной или шестикратной частоте питающего тока (т. е. 150 или 300 Гц соответственно) при работе на промышленной частоте. Схема рекомендуется для работы на мощностях ГИТ 50 кВт и более. Трехфазная схема ГИТ экономичнее, так как время зарядки емкостного накопителя (той же мощности) меньше, чем при использовании однофазной схемы ГИТ. Однако дальнейшее увеличение мощности выпрямителя будет целесообразно только до определенного предела [4].

Повысить экономичность процесса заряда емкостного накопителя ГИТ можно путем использования различных схем с фильтровой емкостью. Схема ГИТ с фильтровой емкостью и индуктивной зарядной цепью рабочей емкости (рис. 3.1, *д*) позволяет получать практически любую частоту чередования импульсов при работе на небольших (до 0,1 мкФ) емкостях и имеет общий электрический КПД около 85 %. Это достигается тем, что фильтровая емкость работает в режиме неполной разрядки (до 20 %), а рабочая емкость заряжается через индуктивную цепь — дроссель с малым активным сопротивлением — в течение одного полупериода в колебательном режиме, задаваемым вращением диска на первом формирующем промежутке. При этом фильтровая емкость превышает рабочую в 15—20 раз [4].

Вращающиеся диски формирующих искровых промежутков сидят на одном валу и поэтому частоту чередования разрядов можно варьировать в очень широких пределах, максимально ограниченных лишь мощностью питающего трансформатора. В этой схеме могут быть использованы трансформаторы на 35—50 кВ, так как она удваивает напряжение. Схема может подсоединяться и непосредственно к высоковольтной сети.

В схеме ГИТ с фильтровой емкостью (рис. 3.1, *е*) поочередное подсоединение рабочей и фильтровой емкостей к рабочему искровому промежутку в жидкости осуществляется при помощи одного вращающегося разрядника – формирующего промежутка [6]. Однако при работе такого ГИТ срабатывание вращающегося разрядника начинается при меньшем напряжении (при сближении шаров) и заканчивается при большем (при удалении шаров), чем это задано минимальным расстоянием между шарами разрядников. Это приводит к нестабильности основного параметра

разрядов — напряжения, а следовательно, к снижению надежности работы генератора.

Для повышения надежности работы ГИТ путем обеспечения заданной стабильности параметров разрядов в схему ГИТ с фильтровой емкостью включают вращающееся коммутирующее устройство — диск со скользящими контактами для поочередного предварительного бестокового включения и выключения зарядного и разрядного контуров.

При подаче напряжения на зарядный контур генератора первоначально заряжается фильтровая емкость. Затем вращающимся контактом без тока (а значит, и без искрения) замыкается цепь, на шарах формирующего разрядника возникает разность потенциалов, происходит пробой и рабочий конденсатор заряжается до напряжения фильтровой емкости. После этого ток в цепи исчезает и контакты вращением диска размыкаются вновь без искрения. Далее вращающимся диском (также без тока и искрения) замыкаются контакты разрядного контура и напряжение рабочего конденсатора подается на формирующий разрядник, происходит его пробой, а также пробой рабочего искрового промежутка в жидкости. При этом рабочий конденсатор разряжается, ток в разрядном контуре прекращается и, следовательно, контакты вращением диска могут быть разомкнуты вновь без разрушающего их искрения. Далее цикл повторяется с частотой следования разрядов, задаваемой частотой вращения диска коммутирующего устройства.

Использование ГИТ этого типа позволяет получать стабильные параметры неподвижных шаровых разрядников и осуществлять замыкание и размыкание цепей зарядного и разрядного контуров в бестоковом режиме, тем самым улучшая все показатели и надежность работы генератора силовой установки.

Была разработана также схема питания электрогидравлических установок, позволяющая наиболее рационально использовать электрическую энергию (с минимумом возможных потерь). В известных электрогидравлических устройствах рабочая камера заземлена и поэтому часть энергии после пробоя рабочего искрового промежутка в жидкости практически теряется, рассеиваясь на заземлении. Кроме того, при каждом разряде рабочего конденсатора на его обкладках сохраняется небольшой (до 10 % от первоначального) заряд.

Опыт показал, что любое электрогидравлическое устройство может эффективно работать по схеме, в которой энергия, запасенная на одном конденсаторе *С1*, пройдя через формирующий промежуток *ФП*, поступает на рабочий искровой промежуток *РП*, где в большей своей части расходуется на совершение полезной работы электрогидравлического удара. Оставшаяся неизрасходованной энергия поступает на второй незаряженный конденсатор *С2*, где и сохраняется для последующего использования (рис. 3.2). После этого энергия дозаряженного до требуемого

значения потенциала второго конденсатора *C2*, пройдя через формирующий промежуток *ФП*, разряжается на рабочий искровой промежуток *РП* и вновь неиспользованная часть ее попадает теперь уже на первый конденсатор *C1* и т. д.

Поочередное подсоединение каждого из конденсаторов то в зарядную, то в разрядную цепь производится переключателем *П*, в котором токопроводящие пластины *A* и *B*, разделенные диэлектриком, поочередно подсоединяются к контактам *1* –*4* зарядного и разрядного контуров.

Колебательный характер процесса способствует тому, что переход энергии при разряде одного конденсатора на другой совершается с некоторым избытком (для заряжаемого конденсатора), что также положительно сказывается на работе этой схемы.

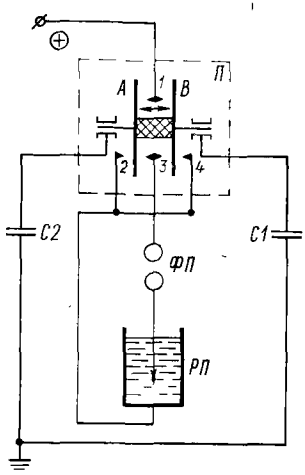


Рис. 3.2. Электрическая схема питания электрогидравлических установок

Для некоторых частных случаев указанную схему можно построить таким образом, чтобы после каждой подзарядки конденсатора (например, *C1*) энергией, «оставшейся» от предыдущего разряда на него конденсатора *C2*, последующий разряд конденсатора *C1* шел через рабочий промежуток на землю, не поступая на подзарядку конденсатора *C2*. Такая работа будет эквивалентна работе сразу на двух режимах, что может быть эффективно использовано на практике (в технологических процессах дробления, разрушения, измельчения и др.).

3.2. Режимы работы ГИТ при электрогидравлической обработке различных материалов

При работе на электрогидравлических установках подбор основных параметров обработки (емкости и напряжения) осуществляется в соответствии с принятыми режимами обработки [3, 6, 7]: жесткий $C \leqslant 0{,}1$ мкФ; $U \geqslant 50$ кВ; средний $0{,}1$ мкФ $\leqslant C \leqslant 1{,}0$ мкФ; 20 кВ $\leqslant U \leqslant 50$ кВ; мягкий – $C \geqslant 1{,}0$ мкФ; $U \leqslant 20$ кВ. Жесткий режим характеризуется бо́льшими давлениями на фронте ударной волны и большей долей энергии, уходящей вместе с нею. С увеличением жесткости режима будут возрастать давление на фронте ударной волны и доля энергии, приходящейся на жесткое акустическое излучение. Световое излучение разряда характеризуется преобладанием жесткой ультрафиолетовой составляющей спектр-излучения. Электрогидравлический удар при этом оказывается относительно коротким (бризантным), более пригодным для осуществления таких процессов, как, например, разрушение твердых и хрупких материалов, наклеп металлов, и менее

пригодным для работ, связанных с пластической деформацией или активным (в возможно большем рабочем объеме) перемешиванием материалов, что имеет очень большое практическое значение при электрогидравлической обработке органики.

Мягкий режим характеризуется меньшими давлениями при значительном увеличении доли энергии, уходящей с волной запаздывающего потока (расширением кавитационной полости), и уменьшением доли энергии, обусловленной фронтом ударной волны. Характерным является преобладание мягких акустических составляющих звукового излучения. Световое излучение разряда характеризуется увеличением инфракрасных составляющих его спектра. Кавитирующее кольцо при этом очень интенсивно и захватывает большие объемы жидкости, соизмеримые со всем объемом рабочей камеры. Увеличение емкости или снижение напряжения приводит к «смягчению» электрогидравлического удара, который становится при этом длительным, метательным, пригодным, например, для пластического деформирования, перетирания мягких или вязких материалов.

На средних режимах примерно до 30 % выделившейся энергии уносится ударной волной и акустическим излучением, а остальная часть энергии уходит при расширении и захлопывании полости с волной запаздывающего потока. На средних режимах рекомендуется осуществлять, например, штамповку различных изделий в зависимости от качества и свойств штампуемого материала.

Следует, однако, иметь в виду, что режимы обработки зависят не только от емкости и напряжения, но и от индуктивности разрядного контура, определяющей крутизну и длительность переднего фронта импульса тока. С увеличением индуктивности разрядного контура увеличивается длительность фронта и уменьшается его крутизна, что перемещает характеристику режима работы в сторону мягких режимов, а с уменьшением индуктивности укорочение длительности переднего фронта импульса тока и увеличение его крутизны делают режим более жестким. Приведенная классификация режимов приемлема только в тех случаях, когда индуктивность разрядного контура имеет значения около 5–15 мкГн.

Длина искры в каждом отдельном случае электрогидравлической обработки подбирается в соответствии с правилом определения напряжения оптимального режима: $U_{opt} = (1{,}2 \div 1{,}3)\ U_{min}$, где U_{min} — среднее напряжение для 50 % пробоев из большого числа разрядов [4, 6]. Указанный способ нахождения напряжений оптимального режима при любой заданной размерами устройства и условиями его работы длине искры относится к случаю определения оптимального выделения энергии только по основным параметрам (длине искры и связанному с ней напряжению). Однако условия получения оптимального режима могут значительно изменяться, например, в зависимости от резонансных и

других свойств обрабатываемого материала. Во всех случаях для выведения любого электрогидравлического устройства на оптимальный режим работы рекомендуется использовать метод «грязного забоя» (см. п. 2.4).

3.3. Основное силовое оборудование ГИТ

Устройства источников питания электрогидравлических установок комплектуются стандартным оборудованием. Каждое силовое устройство включает в себя трансформатор, выпрямитель или реактор (если он собирается по резонансной схеме), конденсатор или блок их, формирующий разрядник или другое коммутирующее устройство на каждый разрядный контур схемы, соединительные кабели и различную стандартную измерительную и вспомогательную аппаратуру [6].

Промышленные силовые установки обычно комплектуются на базе стандартных выпрямителей-трансформаторов типов КВТМ, ВТМ с большим диапазоном мощностей и напряжений. При необходимости в конструкцию трансформатора вносятся изменения. Так, был предложен трансформатор для погружаемых электрогидравлических устройств, включающий в себя выполненный в виде цилиндра магнитопровод с намотанными на него обмотками. Наружный диаметр цилиндра определяется радиальными размерами скважин. Цилиндр имеет сквозную полость для размещения проходных коммуникаций, связывающих электрогидравлическое устройство с наземными узлами энерго- и водопитания. Такая конструкция трансформатора позволяет состыковать его с элементами скважинного электрогидравлического устройства: конденсатором для скважинных устройств, разрядником и буровой головкой (если это электрогидравлический бур) непосредственно в самой скважине, что упрощает эксплуатацию и повышает эффективность скважинных электрогидравлических устройств, так как устраняет необходимость передачи высокого напряжения на забой с помощью специальных высоковольтных кабелей.

В качестве емкостных накопителей для электрогидравлических устройств применяют импульсные высоковольтные конденсаторы с масляными или синтетическими наполнителями типов ИМН, ИМ, ИМК, ИК, ИКГ, ИКВ, ИС. Эти конденсаторы имеют металлический корпус прямоугольной формы, в котором расположена съемная часть (набор спрессованных секций-пакетов), и металлическую крышку. На ней расположены выводы конденсатора, изолированные проходными изоляторами. Для уменьшения индуктивности разрядных контуров схемы конденсаторы необходимо монтировать как можно ближе к рабочим искровым промежуткам электрогидравлических устройств. Так, при построении электрической схемы ГИТ погружаемых электрогидравлических установок был разработан конденсатор для скважинных устройств (рис. 3.3), используемый при производстве буровых работ.

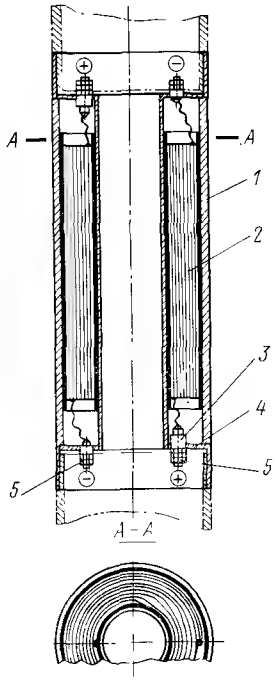


Рис. 3.3. Схема конденсатора для скважинных электрогидравлических устройств:
1 — корпус; *2* — намотка выемной части; *3* — проходной изолятор; *4* — нижняя крышка корпуса; *5* — выводы конденсатора

Герметичный корпус этого конденсатора имеет цилиндрическую форму. Наружный диаметр корпуса определяется реальными размерами скважины. По оси корпуса проходит центральная полость, диаметр которой соответствует размерам коммуникаций, связывающих электрогидравлическое устройство с наземными узлами энерго- и водопитания, размещающимися в этой полости. Изоляция съемной части конденсатора спиральная, из диэлектрика, имеющего ленточную форму (например, конденсаторной бумаги, пропитанной маслом). При заданных внутреннем и наружном диаметрах этой изоляции ширина ленты диэлектрика для обеспечения требуемой емкости конденсатора определяется расчетным путем. Такая конструкция конденсатора позволяет состыковывать его со скважинным электрогидравлическим устройством непосредственно в самой скважине, что существенно уменьшает индуктивность разрядного контура, а следовательно, улучшает технико-экономические показатели работы электрогидравлического устройства.

В качестве коммутирующих устройств в ГИТ электрогидравлических установок используют разрядники различных типов (воздушные атмосферного давления, вакуумные искровые, газонаполненные, игнитронные, тиристорного типа, электронные и др.). Все они должны удовлетворять следующим требованиям: выдерживать рабочее напряжение без перекрытия по изоляции в течение продолжительного времени; иметь хорошую износоустойчивость при коммутации заданной энергии; обладать малыми индуктивностью и сопротивлением по сравнению с электрическими параметрами разрядного контура и малым временем срабатывания и восстановления своих изолирующих свойств; обеспечивать заданную частоту разрядов; удовлетворять санитарным требованиям (по уровню звука, выбросу образовавшихся в момент разряда газов).

Наиболее часто в электрогидравлических установках различного назначения применяют воздушные разрядники атмосферного давления. Они просты по конструкции, надежны в эксплуатации, но имеют значительное время деионизации, что препятствует их использованию при повышенных частотах. Стабильность их работы во многом зависит от условий окружающей среды (влаж-

ности, температуры, состояния поверхности электродов разрядника, запыленности атмосферы). При работе воздушных разрядников образуются вредные для здоровья работающих оксиды азота, озон. Поэтому при эксплуатации разрядников следует предусмотреть их продувку и выброс вредных газов вне пределов рабочего помещения. Кроме того, они должны быть оборудованы глушителями шума разрядов с учетом санитарных норм.

Простейший воздушный формирующий промежуток (разрядник) с глушителем приведен на рис. 3.4. Разрядник успешно используется и в современных установках [6]. В точку разряда шаров разрядника необходимо врезать твердосплавные пластинки, а токоподводы разрядников снабдить радиаторными ребрами для лучшего охлаждения. Современные воздушные разрядники рассчитаны на коммутирование напряжений до 100 кВ и токов до 1000 кА.

Вакуумные разрядники бесшумны, обладают малым индуктивным сопротивлением, однако ограничены в быстродействии и требуют систематической откачки продуктов эрозии электродов разрядника для восстановления вакуума. Применение импульсных водородных тиратронов типа ТГИ сдерживается их высокой стоимостью. Использование в качестве коммутаторов тиристоров ограничено небольшими значениями обратного напряжения (до 2,5 кВ), а при соединении их в последовательную цепочку необходимо синхронизировать их при срабатывании, что приводит к усложнению схемы.

В современных электрогидравлических установках находят широкое применение игнитронные разрядники типов ИРТ-1 — ИРТ-6. Они имеют ряд преимуществ при эксплуатации: управляемы дистанционно, малоиндуктивны, отличаются большой коммутационной способностью по току. К недостаткам относятся низкая частота следования импульсов, малый срок службы (около 10^5 импульсов), невозможность ремонта при выходе из строя.

Отечественной промышленностью выпускаются серийно 6 типов игнитронов: ИРТ 1 — ИРТ-6. Для широкого их внедрения необходимо увеличить частоту их работы, а также срок их службы.

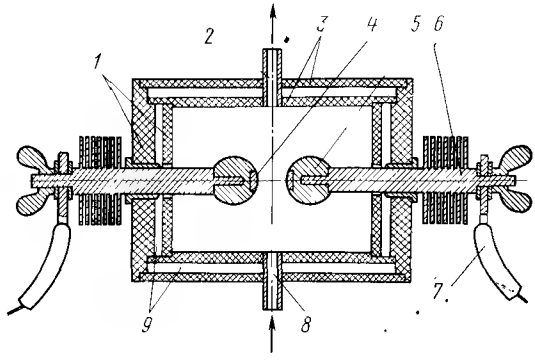


Рис. 3.4. Разрядник с глушителем:
1 — боковые диски из диэлектрика; *2* — патрубок выхода воздуха; *3* — цилиндрические стенки из диэлектрика; *4* — тугоплавкая вставка; *5* — латунные шары; *6* — латунный токопровод с радиатором; *7* — кабель токопровода; *8* — патрубок подвода воздуха; *9* — воздушные зазоры между стенками

Выбор типа кабеля для соединения элементов электрической схемы ГИТ определяется требованиями, которые предъявляются к кабелю электрогидравлических установок: малая индуктивность, изоляция кабеля, способная выдерживать максимум рабочего напряжения в импульсе без термического и механического разрушения; бо́льший срок службы, чем срок службы основных элементов ГИТ (конденсатор, разрядник). Таким требованиям вполне удовлетворяют радиочастотные коаксиальные кабели типа РК и кабель типа КПВМГ, разработанный специально для электрогидравлических установок. Однако следует заметить, что предельные напряжения радиочастотных кабелей весьма небольшие, поэтому актуальной является задача разработки малоиндуктивных, коаксиальных кабелей на напряжения до 100 кВ для использования их в электрогидравлических установках.

Одной из важнейших составляющих электрической схемы разрядного контура ГИТ электрогидравлических установок является рабочий электрод с его изоляцией и системой токопроводов. Основным препятствием в обеспечении длительной непрерывной работы подавляющего большинства электрогидравлических устройств долгое время являлась недостаточная стойкость переднего конца изоляции рабочих электродов. Причиной ее разрушения является сложное термо-химическое и механическое воздействие на изоляцию той части стримеров, которые развиваются в жидкости по границе раздела изоляция — жидкость. Вызывая вначале только слабое термическое воздействие (обжигающее, оплавляющее или деполимеризующее верхний слой изоляции по пути следования стримера), стримеры при последующих разрядах все чаще и чаще проходят по тем же путям, еще более изменяют свойства верхнего слоя изоляции в этих местах и, наконец, обугливают его. Этим создаются хорошо проводящие пути, по которым разряды из случайных становятся постоянно проходящими, все более и более усиливая обугливание и углубляя его в тело изолятора.

Когда ожог достаточно углубится в торец изоляции, начинают сказываться чисто механические факторы воздействия на изоляцию электрода, которые имеют место при кавитационных ударах, возникающих при захлопывании полостей, и вызывающие внедрение в тело изоляции струй воды и частиц обрабатываемого материала. Гидравлические удары, воздействуя на клиновидную щель ожога, приводят к механическому разрыву — распарыванию — ее изоляции и появлению новых, еще более заглубленных внутрь изоляции ожогов. В конечном итоге это приводит к постепенному «прорезанию» изоляции по всей длине стержня электрода.

Как только изоляция оказывается нарушенной, немедленно нарушается условие получения сверхдлинных разрядов, резко возрастают потери, вследствие чего работа данного электрогидравлического устройства перестает быть экономичной. При этом разряды за счет резкого увеличения потерь, растущих вместе с уве

личением активной поверхности рабочего (положительного) электрода, могут вообще прекратиться.

Эти нежелательные явления могут быть устранены различными средствами защиты переднего конца электрода, в результате чего ресурс электродов может быть увеличен на 1—2 порядка. Автором были предложены следующие способы защиты: изменение формы переднего конца электрода — выполнение его в виде «тарелочки», «юбочки», шарика из мягкого металла с одновременным выполнением нижней части электрода пружинящей; введение в систему электрода «отвлекающих» стримеры тонких кольцевых вставок, расположенных выше конца электрода и выступающих из изоляции; локализация поля установкой второго электрода в виде острия и т. д.

На рис. 3.5 изображен конструктивный вариант электрода со стойкой изоляцией [3, 6]. Электрод выполнен из тонкой проволоки, этим, во-первых, создается дополнительная жидкостная изоляция между электродом и его твердой изоляцией на переднем конце электрода, что препятствует развитию стримеров на границе раздела изоляция — жидкость; во-вторых, тонкий стержень электрода, далеко выступая из изоляции, как бы «отводит» от нее стримеры, которые обычно тем интенсивнее растут из конца электрода, чем тоньше этот конец, и, в-третьих, активная поверхность далеко выступающего из изоляции конца тонкого электрода ввиду малого диаметра его не превышает активной поверхности обычно применявшегося толстого электрода, чуть выступавшего из изоляции.

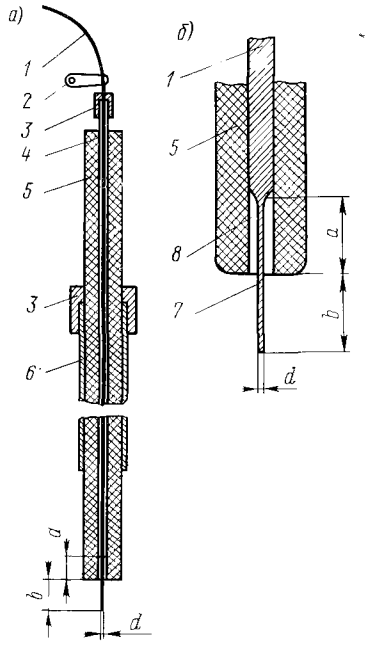


Рис. 3.5. Схемы конструкции рабочего электрода: *а* — промышленный вариант; *б* — лабораторный вариант (*a* — заглубление тонкой части стержня в изоляцию; *b* — выступающая из изоляции часть стержня; *d* — диаметр тонкой части стержня электрода);

1 — центральный стержень электрода; *2* — подсоединение положительного полюса тока; *3* — цанговый зажим, *4* — латунная трубка — направляющая центрального стержня; *5* — изоляция; *6* — направляющая латунная трубка; *7* — выступающий тонкий конец электрода; *8* — заполняемый жидкостью зазор между стержнем и изоляцией

Материал тела электрода может быть любым (сталь, медь, алюминий), но чем меньше толщина переднего конца электрода, а следовательно, интенсивнее охлаждение окружающей его жидкостью, тем меньше эрозия такого электрода. Еще больше можно уменьшить эрозию лужением конца электрода мягкими металлами (оловом, свинцом, алюминием).

Практически оказалось, что при напряжении до 100 кВ в зависимости от размера рабочей емкости диаметр проволоки рабочего электрода может быть принят следующим: до 0,1 мкФ — 0,2—1,0 мм; до 1,0 мкФ — 2,0 4,0 мм; до 5,0 мкФ — 3,0—6,0 мм. Направляющая электрод металлическая трубка в зависимости от размера рабочей емкости не должна доходить до конца изоляции на 20—60 мм, а проволочный электрод также в зависимости от размера рабочей емкости должен выступать из изоляции на 20—80 мм.

Для уменьшения электрических потерь в электрогидравлических установках, в которых подача рабочей жидкости совершается через незаземленный полый электрод, необходимо внутреннюю поверхность электрода изолировать слоем диэлектрика. Рабочая жидкость благодаря изоляционному слою не контактирует непосредственно с токопроводящим трубчатым стержнем электрода, и электрические потери в этом случае сводятся к минимуму.

Форма электрода также может играть определенную роль при различных видах электрогидравлической обработки. Так, в электрогидравлическом устройстве для очистки труб выполнение второго электрода в виде упругих петель каплевидной формы с вогнутыми, связанными между собой вершинами, вытянутыми вдоль линии перемещения устройства, обеспечивает идеальную очистку труб, водозаборных фильтров, артезианских скважин и т. п.

Важным условием обеспечения стабильной работы электрогидравлического устройства в оптимальном режиме является и сохранение постоянной величины рабочего искрового промежутка. Для этого при электрогидравлической обработке объектов (одновременно являющихся вторым электродом) с неровной поверхностью или группы изделий разной высоты (например, при электрогидравлической очистке изделий, снятии напряжений) предложено устройство, позволяющее автоматически регулировать величину искрового промежутка между электродом и обрабатываемым изделием (см. рис. 4.2).

3.4. Перспективы совершенствования оборудования электрогидравлических силовых установок

Решение вопросов совершенствования силовых установок (ГИТ) электрогидравлических устройств любой мощности зависит от разработки и внедрения комплектующего оборудования ГИТ, выполненного на основе использования реверсивного разряда и импульсных диэлектриков.

Импульсные конденсаторы. Импульсные конденсаторы подобно обычным состоят из двух групп пластин, электрически соединенных между собой. Рабочей — изолирующей — средой между ними могут быть разнообразные ионопроводящие жидкие, твердые или газообразные вещества и даже плазма.

Рассмотрим простейший тип импульсного конденсатора с водяной изоляцией [36], состоящий из резервуара с водой и погруженных в него металлических пластин (рис. 3.6). Корпус резервуара может быть выполнен металлическим и использован в качестве одного из электродов или заземлен. Материал металлических пластин, помещаемых в воду, как и металл корпуса, должен быть выполнен из материала, устойчивого против действия воды.

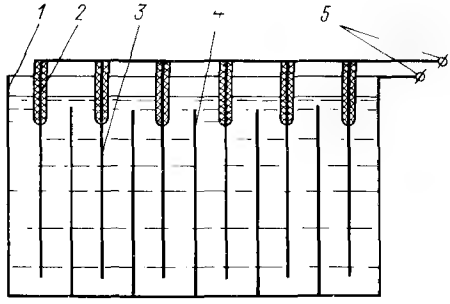


Рис. 3.6. Принципиальная схема импульсного конденсатора с водяной изоляцией: *1* — ванна (одна из обкладок); *2* — проходной изолятор против скользящих разрядов; *3* — пластина конденсатора; *4* — вторая пластина, соединенная с ванной; *5* — токоподводы

Поскольку обе группы пластин такого конденсатора практически равнозначны в происходящих в нем процессах, то говорить о каком-то различии их работы на разных полярностях включения будет невозможно. Однако размеры пластин импульсного конденсатора имеют существенное значение для эффективности его работы. При униполярном импульсе, поданном на такой конденсатор, одна из пластин, оказавшаяся положительной, имея большую активную, т. е. соприкасающуюся с водой, поверхность, вызовет появление настолько больших электрических потерь, что создание подобного конденсатора может потерять всякий смысл. При большой активной поверхности положительного электрода (пластины) время, в течение которого потери будут минимальны, может оказаться недостаточным для того, чтобы конденсатор успел зарядиться и разрядиться, не потеряв при этом весь свой заряд.

Отсюда становится очевидной необходимость резкого уменьшения активной поверхности пластин конденсатора, несущих положительный заряд. Это достигается введением такой изоляции положительных пластин, которая, не уменьшая их электрической емкости, резко уменьшает их активную (соприкасающуюся с водой) поверхность. В качестве изоляции можно использовать какую либо микропористую изоляцию из геля или просто экран.

Если же поверхность пластины электрически полностью изолировать от воды, то это «выключит» и весь тот «механизм» ионной изоляции, о котором говорилось выше. Подобная изоляция начнет столь же просто пробиваться разрядами, как это случается в обычных конденсаторах. Однако при импульсном питании конденсатора каждый обычный пробой его будет придавать этому конденсатору особые свойства. Так, пробив изоляцию только один раз, подобный пробой вызовет немедленное «включение» ионного «механизма», свойственного импульсным диэлектрикам. Отсюда

следует, что такие поры надлежит заготовить заранее, сделав их при этом и в необходимом количестве и соответствующего размера. Поры должны быть достаточно малого диаметра с тем, чтобы препятствовать свободному движению ионов, и в то же время достаточными, чтобы не мешать электрическому контакту пластины с жидкостью. Рассчитать количество и размеры таких пор чрезвычайно сложно. Однако эта задача оказывается решенной, если изоляция частично или полностью будет выполнена из геля.

В самом деле, если таких пор в обычной изоляции не делать совсем, то они появятся сами — их пробьет разряд и пробьет ровно столько, сколько сможет пробить, а это и есть тот самый оптимальный вариант, который необходим для данного случая. Если же изоляцию выполнить из геля, то каждый разряд, пробивая гель, будет «открывать» в нем поры в количестве, соответствующем заданной напряженности электрического поля, а «закрываться» они будут сами, поскольку гель обладает ярко выраженной способностью к «самовосстановлению» после механических повреждений. После того как пик напряжения спадет и энергия движения ионов уменьшится, ионы начнут задерживаться и тормозиться в порах, закрывая их. В дальнейшем поры в геле будут открываться только тогда, когда напряженность поля достигнет максимума и окажется способной сдвинуть с места ионы, закупорившие поры.

В конденсаторах каждая пластина обычно размещается между двумя другими, таким образом, необходима полная, покрывающая всю поверхность пластины пористая изоляция каждой из них. В этой связи рассмотрим вопрос о конструктивном размещении пористой изоляции пластин. Следует ли выполнять ее плотно прилегающей к пластине или этого можно избежать, ограничившись только свободным, без плотного прилегания изоляции, экранизированием пластин друг от друга? Исследования позволяют сделать вывод, что покрытия с плотно облегающей изоляцией могут быть заменены экранами с преимущественным размещением их вблизи защищаемой ими положительной пластины.

Таким образом, импульсный конденсатор должен выполняться либо с изоляцией, уже имеющей заданное микропористое строение, либо с изоляцией из геля, либо с комбинированной изоляцией, содержащей в себе гель, размещаемый, как в поддержке, в крупных порах основной изоляции. Однако при этом стримеры, проходя сквозь поры изоляции и развиваясь от положительной пластины, будут расти к пластине противоположного знака так же хорошо, как если бы у нас были созданы все условия для возникновения сверхдлинного разряда. Отсюда очевидно, что решение задачи путем создания изоляции вокруг положительного электрода-пластины может дать некоторый эффект только в том случае, если изоляция поставлена довольно далеко от пластины. Следовательно, работа импульсного конденсатора должна осу-

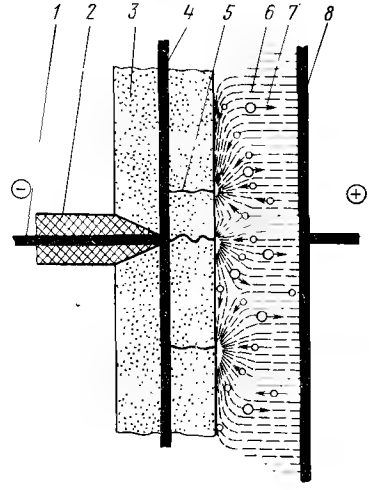


Рис. 3.7. Принципиальная схема электрического поля между электродами импульсного конденсатора с изоляцией отрицательной пластины гелем при работе на обратной полярности: *1* — стержень отрицательного электрода; *2* — изоляция электрода; *3* — пористое покрытие отрицательного электрода из геля; *4* — отрицательная пластина конденсатора; *5* — канал стримерного пробоя в толще геля; *6* — линии напряженности электрического поля в жидкости; *7* — движение ионов OH^- (большие кружки) и ионов H^+ (малые кружки); *8* — положительная пластина конденсатора

ществляться на такой полярности пластин, при которой стример, выходящий или входящий в защищаемую пластину, не мог бы расти к другой пластине и подобно стримеру, входящему в отрицательный электрод при реверсивном разряде, «пятился» бы от нее в противоположном направлении. Это условие может быть выполнено только при работе на обратной полярности и только в тех случаях, когда электрическая изоляция описанной выше структуры (в том числе и гелевая, пористая с гелем, или экран) закрывает не положительную, а отрицательную пластину, оставляя совершенно свободным от изоляции положительный электрод.

Отметим, однако, что относительно небольшая изоляция положительного электрода будет тем не менее полезной, поскольку, изменяя ее форму, можно изменять конфигурацию силового поля таким образом, чтобы при этом максимально увеличились «непробиваемые» и другие положительные свойства конденсатора. Указанные особенности становятся особенно важными при переводе импульсного конденсатора на режим обратной полярности режим реверсивного разряда. В этом случае стримеры пробоев, даже выходя из пор, будут только «стелиться» по поверхности пористой изоляции пластины, даже не пытаясь направиться ко второму электроду, – конденсатор станет «непробиваемым». Вблизи поверхности пористой изоляции пластины при этом возникает плотный объемный заряд, состоящий в основном из положительных ионов, являющихся непреодолимой преградой для растущих стримеров и надежно преграждающий им путь ко второму электроду.

Конфигурация электрического поля между электродами импульсного конденсатора с изоляцией отрицательной пластины пористым материалом (гелем) при работе на обратной полярности показана на рис. 3.7.

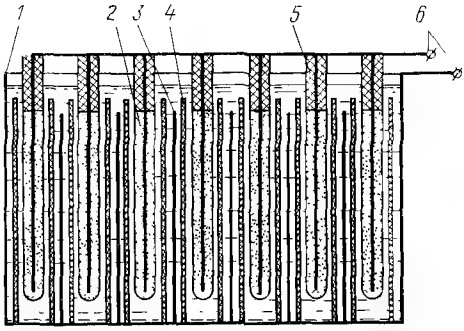


Рис. 3.8. Принципиальная схема импульсного конденсатора с пористой гелевой изоляцией отрицательных и экранной изоляцией положительных пластин:

1 — ванна — одна из обкладок конденсатора; *2* — пористая, гелевая изоляция отрицательных пластин; *3* — соединенные с ванной положительные пластины; *4* — диэлектрические экраны положительных пластин; *5* — проходные изоляторы (против скользящих разрядов); *6* — токопроводы

На рис. 3.8 приведена принципиальная схема импульсного конденсатора, в котором отрицательная пластина имеет пористую изоляцию, заполненную гелем, а положительная — изоляцию в виде экранов. Такой конденсатор может быть выполнен и цилиндрическим с проходным отверстием по оси, что особенно важно, например, для электрогидравлического бурения. Питание импульсных конденсаторов рационально осуществлять от специальных силовых установок, выполняемых по одной из приводимых ниже принципиальных электрических схем.

На рис. 3.9 приведена принципиальная схема питания импульсного конденсатора от разряда импульсного трансформатора. Импульс, создаваемый в первичной цепи источника питания, хотя несколько и «расплывается» после его трансформации, но тем не менее оказывается вполне приемлемым для эффективной работы импульсного конденсатора.

Принципиальная электрическая схема с питанием «от разряда конденсатора» приведена на рис. 3.10. Питание импульсного конденсатора осуществляется импульсом, создаваемым разрядом конденсатора в первичной цепи питания. Применение указанных схем питания позволяет использовать в них обычные, не импульсные, конденсаторы, которые на практике в качестве рабочих конденсаторов электрогидравлических установок длительное время работать бы не смогли. Однако, формируя относительно короткий импульс, не опасный для их конструкции, но тем не менее достаточный для продуктивной работы импульсного конденсатора,

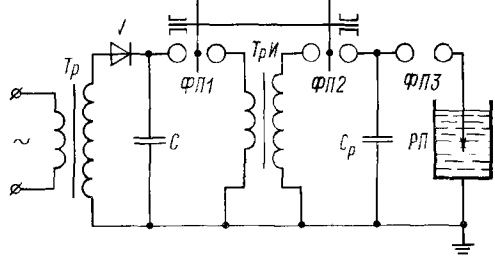


Рис. 3.9. Принципиальная схема питания импульсного конденсатора от импульсного трансформатора:

Тр — трансформатор, *V* — выпрямитель, *С* — конденсатор; *ФП1* — управляющий формирующий промежуток с синхронизатором; *ТрИ* — импульсный трансформатор, *ФП2* — управляемый формирующий промежуток; $C_р$ — рабочий импульсный конденсатор; *ФП3* — формирующий промежуток, *РП* — рабочий искровой промежуток в жидкости

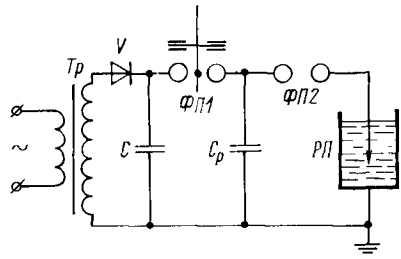


Рис. 3.10. Принципиальная схема питания импульсного конденсатора от разряда конденсатора.
Тр - трансформатор; *V* - выпрямитель, *С* — питающий конденсатор; *ФП1* управляющий формирующий промежуток с синхронизатором, $C_р$ рабочий импульсный конденсатор; *ФП2* - формирующий промежуток; *РП* рабочий искровой промежуток в жидкости

такие обычные конденсаторы оказываются вполне пригодными для длительной и надежной работы в новых схемах питания электрогидравлических установок, основанных на использовании реверсивного разряда и импульсных диэлектриков.

Использование импульсных конденсаторов позволяет осуществить своеобразную трансформацию крутизны фронта длительного первичного импульса, преобразовав его в короткий, крутой фронт вторичного – рабочего – импульса. В этой связи приведем описание одного из ранних опытов. Если на очень тонком оголенном проводнике положительного электрода закрепить большую и тонкую металлическую пластинку таким образом, чтобы плоскость ее совпадала с направлением проводника, а конец проводника выступал за край пластины не менее чем на 5—8 см, то оказывается, что такое подключение не только не вызывает потерь, сказывающихся прежде всего на длине искры, но даже уменьшает их. В опыте искра между концом проводника (положительным электродом) и проводником отрицательного электрода оказывается даже несколько большей, чем раньше (до подключения пластины). Этот пример наглядно показывает проявление действия импульсного конденсатора, образованного пластиной и вторым проводником. За счет более крутого фронта импульса разряд стал длиннее, так как стримеры его при более мощном импульсе росли, и скорее и на большее расстояние. На рис. 3.11 приведена принципиальная схема этого опыта.

Применение импульсных конденсаторов позволяет резко повысить общий электрический КПД установки, а следовательно, и экономику всех процессов электрогидравлической обработки.

Применение импульсных конденсаторов может быть перспективно и для передачи энергии по линиям обычных токопередач методом стоячей волны, что позволит резко сократить расходы на строительство и эксплуатацию этих линий. В будущем области

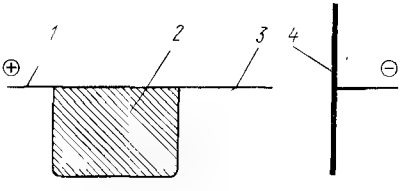


Рис. 3.11. Принципиальная схема опыта с подключением пластины в роли импульсного конденсатора. *1* — положительный электрод в жидкости; *2* подсоединенная пластина; *3* — «искровой» конец электрода; *4* — пластина отрицательного электрода

применения и конструктивное выполнение импульсных конденсаторов будут, по-видимому, чрезвычайно многообразными.

Импульсные кабели. Подобно обычным импульсные кабели также выполняют из двух основных токоведущих элементов: центральной жилы и коаксиально окружающей ее металлической оболочки, разделенных пространством, заполненным теперь уже не обычным, а импульсным диэлектриком. В этом случае деталь с отрицательной полярностью для уменьшения потерь и достижения эффекта непробиваемости рационально изолировать либо несущим гель пористым диэлектриком, либо только гелем, а также экранами.

Для электрогидравлической установки бурения шпуров был предложен кабель [22] с водяной изоляцией (рис. 3.12), в котором для лучшего омывания его средой и удаления газов применяют снабженные отверстиями, центрирующие центральную токонесущую жилу кольцевые прокладки. Вода, заполняющая полость бура через отверстия в этих прокладках, может свободно проникать в полость кабеля, обеспечивая этим изоляцию его токонесущей центральной жилы.

Импульсные выпрямители. Основанием для создания импульсных выпрямителей послужили установленные закономерности пробоя при реверсивном разряде. Так, если на прямой полярности при напряжении 100 кВ емкости 1,0 мкФ в технической воде пробивается рабочий искровой промежуток длиной около 1 м, то при переходе на обратную полярность (реверсивный разряд) повторяющийся устойчивый пробой наступает только после сближения электродов до 8 10 см. Таким образом, на прямой полярности пробой возникает при напряженности поля около 1 кВ/см, на обратной полярности — при 10 12,5 кВ/см. Это обстоятельство позволяет создать ряд приборов и устройств, которые при работе на прямой полярности будут способны свободно и практически без потерь пропускать, например, через восьмисантиметровый искровой промежуток, импульсы тока при напряжении 5—10 кВ, а при изменении полярности не пропускать импульсы тока до 100 кВ.

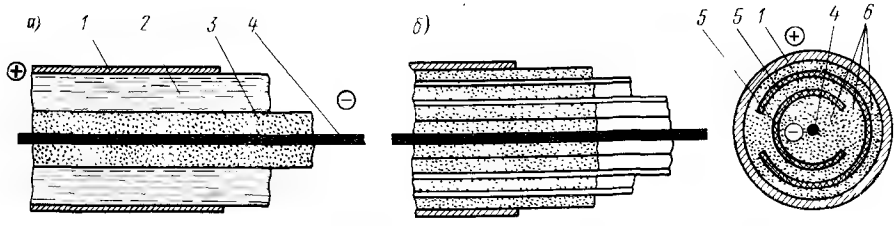


Рис. 3.12. Принципиальная схема импульсного кабеля с водяной изоляцией: *а* — простейший вариант, *б* вариант с экранами,

1 - коаксиальная внешняя проводящая оболочка положительный полюс тока; *2* вода или гель — импульсный диэлектрик; *3* — пористая изоляция отрицательного электрода из обычного диэлектрика или геля; *4* — центральная жила отрицательный полюс тока; *5* экраны из диэлектрика, *6* изоляция из воды или геля

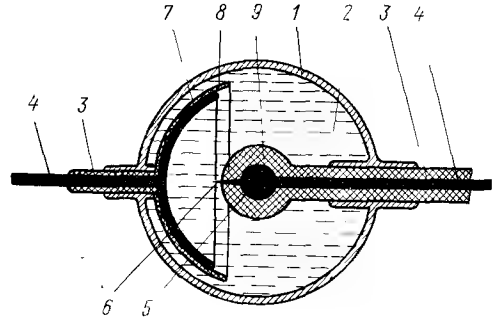


Рис. 3.13. Принципиальная схема выпрямителя с водяной изоляцией:
1 внешняя проводящая оболочка корпус устройства, *2* жидкость (вода или гель) импульсный диэлектрик; *3* изоляция электрода; *4* токопровод; *5* — выравниватель поля - утолщение электрода, *6* острие, *7* — пластина электрода; *8* изоляция пластины; *9* — изоляция выравнивателя поля

Устройство, выполненное таким образом, оказывается способным работать в вентильном режиме, и с тем более высоким КПД, чем выше частота питающего его тока. На рис. 3.13 приведена принципиальная схема подобного выпрямителя с водяной изоляцией. Очевидно, что изложенные способы получения импульсных диэлектриков могут быть применены при создании промышленных образцов подобных устройств. Такие устройства могут найти широкое применение в технике сильных высокочастотных токов высокого напряжения (например, при эксплуатации соответствующих линий токопередач).

Выключатели импульсных токов большой мощности. Значительный интерес представляет возможность создания выключателей импульсных токов большой мощности. Хотя эти выключатели предназначены в первую очередь для импульсных токов, но они также могут быть использованы и в линиях современных токопередач постоянного тока высокого напряжения, так как «бросок мощности», возникающий при разрыве подобной линии, есть не что иное, как тот самый импульс, который эти выключатели способны и разорвать, и погасить. Основными задачами всех типов существующих выключателей являются гашение и разрыв сверхмощной дуги броска тока, возникающего вслед за разрывом линии.

Оказалось, что способ получения реверсивных разрядов может быть успешно использован и при создании выключателей для линий токопередач. Для этого дуговой разряд между быстро раздвигающимися контактами разрывающего устройства-рубильника нужно заменить реверсивным кистевым разрядом между специальными электродами, помещенными в воде или другой жидкости. При этом разряд сопровождается небольшими потерями тока вследствие электролиза жидкости, звуковым эффектом и гарантией того, что этот кистевой разряд никогда не замкнет электродов и не превратится в разрушительный искровой, а тем более дуговой разряд, так как развивается он не как обычный от одного электрода к другому, а только как реверсивный (разряд, идущий в обратную сторону от противоположного электрода).

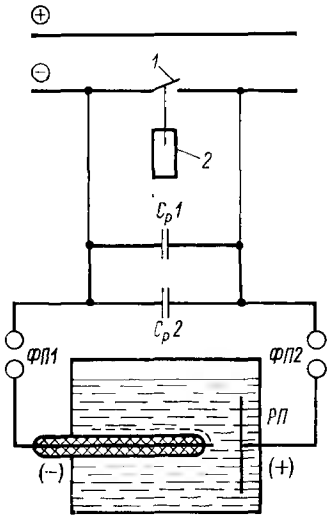


Рис. 3.14 Принципиальная схема выключателя сверхмощных токов и напряжений

На рис. 3.14 приведена принципиальная схема выключателя сверхмощных токов и напряжений с использованием реверсивного разряда. Работа устройства осуществляется следующим образом. Для разрыва одной из линий постоянного тока в цепь этой линии включается управляемый рубильник *1*. При этом необходимо иметь в виду, что всякая линия постоянного тока обязательно образует в месте своего разрыва, где бы он ни находился, два полюса: положительный и отрицательный. Условимся, что в данном случае положительный полюс тока оказывается там, где он показан на рисунке.

Рубильник *1* срабатывает, например, от взрыва порохового запала (*2* — взрывной привод рубильника), и между его расходящимися контактами должна обязательно возникнуть дуга. Однако параллельно рубильнику в сеть включена батарея статических конденсаторов заданной емкости C_p1 — C_p2, в которую прежде всего и направится бросок тока, быстро заряжая ее. Емкость этой батареи недостаточна, чтобы принять на себя весь ток линии за время, пока раздвигаются контакты основного рубильника. Подобная батарея, к сожалению, оказалась бы слишком громоздкой и технически неосуществимой. Тем не менее та батарея, которая предполагается к установке в схеме данного выключателя, обычна по своим габаритным размерам, поскольку ее задачами являются только смягчение пика броска мощности и перевод основного тока броска в иное русло — русло реверсивного разряда. Батарея вместе с шаровыми разрядниками *ФП1* и *ФП2* и *РП* образует разрядный контур хорошо известной нам электрогидравлической схемы, настроенной на реверсивный разряд. Поэтому, как только батарея зарядилась, приняв основной пик броска мощности и не допустив дугу разгореться особенно интенсивно, шаровые разрядники пробиваются и на рабочем промежутке возникает реверсивный разряд. При этом конденсаторы немедленно разряжаются и оказываются в состоянии снова отбирать ток от дуги, которая все более и более гаснет. Контакты рубильника *1* продолжают быстро раздвигаться, условия существования дуги ухудшаются. Если она еще существует, то конденсаторный блок и реверсивные разряды продолжают отбирать энергию броска мощности до тех пор, пока будет необходимо. Средствами обратной связи просигнализируют о затухании дуги в систему, в схеме отключатся рубильники и линия будет полностью отключена.

Глава 4

Применение электрогидравлического эффекта в технологии машиностроения и металлообработке

4.1. Электрогидравлическая очистка

Среди разнообразных областей применения электрогидравлического эффекта в настоящее время наибольшее применение получила электрогидравлическая очистка и особенно очистка литья [6, 19, 40, 46, 54, 64, 65]. Метод электрогидравлической очистки как черного, так и цветного литья позволил решить множество проблем, связанных с этой наиболее трудоемкой, немеханизированной и вредной для здоровья технологической операцией современного машиностроения. Трудоемкость традиционных способов очистки составляет 25—30 % трудоемкости всего процесса литейного производства.

Применение электрогидравлического способа для очистки отливок от стержней и формовочных смесей полностью устраняет ручной труд и пылеобразование на участках очистки литья, улучшает условия труда в литейных цехах, позволяет высвободить от тяжелого и вредного труда многие тысячи рабочих. Ежегодный экономический эффект от внедрения электрогидравлических установок очистки литья превышает 10 млн. руб.

Первые опыты по электрогидравлической очистке металлических поверхностей были поставлены автором в 1953 г., а первая опытно-промышленная установка для электрогидравлической очистки литья была построена в 1959 г. на станкостроительном заводе им. Я. М. Свердлова в Ленинграде (ныне ЛПСО им. Я. М. Свердлова). Сейчас в СССР успешно работают сотни установок, выпускаемых серийно.

Все действующие электрогидравлические установки для очистки литья принципиально однотипны и отличаются друг от друга лишь по способу загрузки, выгрузки и перемещения отливок: тупиковые — при загрузке и выгрузке с одной и той же стороны; проходные — при загрузке и выгрузке с разных сторон (используются в основном для очистки мелких изделий, изготовляемых по выплавляемым моделям) и конвейерные установки.

В настоящее время Опытным заводом ПКБ электрогидравлики АН УССР и заводом Амурлитмаш серийно выпускаются установки «тупиковые» моделей 36111, 36121 А, 36131 А, 36141 А,

«проходные» — моделей 36211, 36212, 36215, «Искра-18», «Искра-23», «Искра 30», установки для очистки точного литья — моделей 67511-А, «Искра-27», «Искра-31»; «конвейерные» — моделей 36313, «Искра-15», «Искра-22», «Искра-26», «Искра-33». Эти установки предназначены для очистки отливок массой от 25 до 5000 кг и более с расходом электроэнергии от 5 до 25 кВт·ч/т и средней призводительностью от 1 до 15 т/ч.

Принципиальное электрогидравлическое устройство для очистки литья [19, 65] содержит рабочую заземленную ванну, являющуюся отрицательным электродом, с размещенными в ней подвижными или неподвижными положительными электродами. При этом искровой разряд может осуществляться как между положительным электродом и дном ванны, так и между положительным электродом и очищаемым изделием. Возникающие в рабочей камере электрогидравлические удары производят работу по очистке отливок от стержней и формовочных смесей.

Автором разработано шесть основных типов установок для электрогидравлической очистки литья [46, 64, 65]:

1) ванного типа — для очистки крупного литья массой до 50 т при мелкосерийном производстве;

2) конвейерного типа — для очистки мелкого и среднего литья массой до 1 т при крупносерийном производстве;

3) барабанного типа – для очистки мелкого литья при массовом выпуске отливок, сходных по массе и размерам;

4) типа «швабра» — для индивидуальной очистки очень крупных отливок массой более 50 т без погружения их в воду;

5) автоматического типа — для очистки небольших по размеру и массе, но сложных по конфигурации изделий в массовом производстве;

6) мониторного типа — для замены гидромониторных установок обычной очистки литья.

Каждый тип установки рассчитан на выполнение определенных задач и не является универсальным. В установках первых пяти типов используют принцип механического действия мощных электрогидравлических ударов, интенсивно отслаивающих все виды формовочных земель и составов от поверхности отливок и разрушающих стержни всех типов в этих отливках. Работа установок 6-го типа основана на использовании импульсной абразивной струи, выбрасываемой мощным электрогидравлическим насосом импульсного действия. В отличие от установок первых пяти типов, слабо удаляющих пригар и поверхностную пленку окалины, установки мониторного типа легко удаляют пригар и пленку окалины вплоть до снятия слоя металла с отливки.

Отметим, что при электрогидравлической очистке металл очищаемого изделия практически не разрушается, если не считать слабых следов «ожогов» от разрядов, заметных только на гладкой или полированной поверхности. Однако, если изделие имеет скрытые в нем и незаметные для глаза трещины, то вероятность

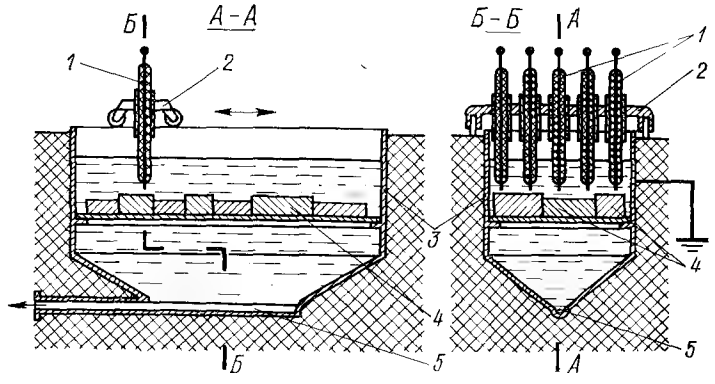


Рис. 4.1. Установка ванного типа для электрогидравлической очистки литья
1 — электроды; *2* — подвижная каретка; *3* — корпус ванны; *4* — очищаемые отливки; *5* — лоток трубопровода

того, что оно расколется на части по этим трещинам, очень велика. Таким образом, практически при электрогидравлической очистке добавочно осуществляется своеобразный технологический контроль качества изделий.

Электрогидравлическая установка ванного типа [65] приведена на рис. 4.1. В заглубленной до уровня пола ванне необходимого объема, недалеко от ее дна, установлена сменная решетка, загружаемая вплотную в один слой изделиями, подлежащими очистке. Пока одна решетка с изделиями чистится в ванне, вторая — выгружается, а третья — загружается изделиями и готовится к погружению в ванну. Все процессы выгрузки, погрузки и перемещения решеток совершаются средствами обычной цеховой механизации и никаких дополнительных устройств не требуют. Для загрузки каждой решетки изделия подбираются группами по высоте так, чтобы колебания высоты не превышали 50 -100 мм. При размещении изделий на решетке необходимо предусмотреть, чтобы наибольшие отверстия изделий оказались бы снизу (лежащими на решетке) и через них могли бы беспрепятственно высыпаться на дно ванны отстающая формовочная земля и куски стержней.

Над ванной размещается перемещающийся над нею портал или кронштейн с кареткой, на котором укреплены электроды. Разряды с электродов, следуя на отливки, лежащие на заземленной решетке, погруженной в ванну, создают электрогидравлические удары, очищающие литье. Электродов на портале или кронштейне может быть много (когда ванна широка или формовочный состав особо прочен) или только один, но тогда этому электроду, кроме прямого поступательного движения вместе с порталом вдоль ванны, придают периодическое (вправо — влево) перемещение или покачивание поперек ванны. Разрушение слоя

формовочной земли, покрывающей отливку, осуществляется прежде всего действием кавитационных гидравлических ударов, возникающих при захлопывании полостей. Основные гидравлические удары, возникающие при расширении полостей, играют вспомогательную роль, удаляя с очищаемой поверхности уже отбитую формовочную землю или отслаивая снизу уже растрескавшиеся ее слои.

Учитывая, что «пятно очистки», т. е. площадь на поверхности отливки, очищаемая одним электрогидравлическим ударом, при обычных формовочных составах, как правило, имеет диаметр около 150—400 мм, электроды на портале располагают друг от друга на расстояние, равное 300—400 мм. Если же электрод только один, то скорость его движения вдоль портала подбирают таким образом, чтобы расстояние между двумя его проходами поперек ванны составляло ту же величину.

Режим работы и скорость продольного перемещения портала подбирают так, чтобы за время одного полного перемещения портала (или одиночного электрода) от одного конца ванны до другого весь цикл очистки был полностью закончен и литье могло бы идти на выгрузку.

В электрогидравлических установках конвейерного типа [65] в ванне, расположенной под порталом с электродами, по конвейеру беспрерывно движутся очищаемые отливки, полная очистка которых совершается за один проход. Оптимальная длина рабочего искрового промежутка при выбранном режиме очистки имеет важное значение для эффективной работы установки, поэтому необходимо подбирать отливки по высоте или вводить в конструкцию устройства регуляторы длины рабочего промежутка. Поскольку подбор изделий по высоте в мелкосерийном производстве затруднен, то следует применять всякого рода регуляторы длины рабочего искрового промежутка. Наиболее простой из них приведен на рис. 4.2. Это приспособление, скользящее по поверхности отливок и через тягу передающее перемещение электроду, позволяет автоматически выдерживать постоянным заданное расстояние от конца электрода до отливки, т. е. длину рабочего искрового промежутка, независимо от колебания высоты отливок.

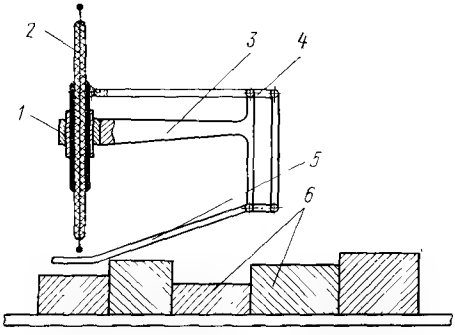


Рис. 4.2. Приспособление для регулирования длины рабочего искрового промежутка в установках конвейерного типа
1 — швеллерная балка, несущая электроды; *2* — электрод; *3* — кронштейн балки; *4* — тяга регулятора; *5* — скользящая вилка регулятора; *6* — очищаемые отливки

Установки конвейерного типа обладают большой эф

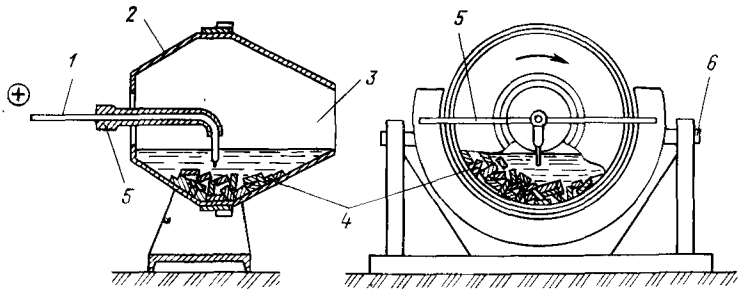


Рис. 4.3. Установка барабанного типа для электрогидравлической очистки литья:
1 — положительный электрод; *2* — барабан; *3* — загрузочно-разгрузочное отверстие; *4* — очищаемые изделия; *5* — держатель электрода, *6* — ось наклона барабана

фективностью по сравнению с установками ванного типа. Очистка отливок по конвейерной схеме без выколачивания из их опок (т. е. вместе с ними) осуществляется путем удлинения и объединения литейного конвейера с конвейером установки электрогидравлической очистки литья. Формовочная земля под действием электрогидравлических ударов высвобождается из опок, отслаивается от литья и вместе со стержневыми составами падает на дно конвейерной ванны, откуда грязевым насосом перекачивается на регенерацию, промывку, рассев, просушку и затем без потерь возвращается в литейное производство.

Электрогидравлические установки барабанного типа [65] периодического действия (рис. 4.3) служат для очистки мелкого литья черных и цветных металлов. При вращении барабана с насыпанными в него изделиями, подлежащими очистке, каждое из них периодически попадает под действие электрогидравлических ударов от разрядов, возникающих с одного или группы электродов, на массу изделий, расположенных под ними. Для очистки более крупных отливок внутренние стенки барабана могут быть выполнены с ребрами. Вода, непрерывно поступающая в барабан, уносит разрушенные стержни и формовочную землю, оставляя изделия чистыми.

После завершения очистки изделия подаются в транспортную тележку, а в барабан загружается для очистки следующая партия изделий.

Для обеспечения нормальной работы установки необходимо соблюдать оптимальный объем загрузки, при котором принятая, оптимальная для данного режима средняя длина рабочего искрового промежутка сохраняется стабильной. При чрезмерном увеличении загрузки отливки могут закоротить рабочий искровой промежуток и работа устройства прекратится. В настоящее время серийно выпускаются электрогидравлические установки этого типа (например, модели 67511 и др.).

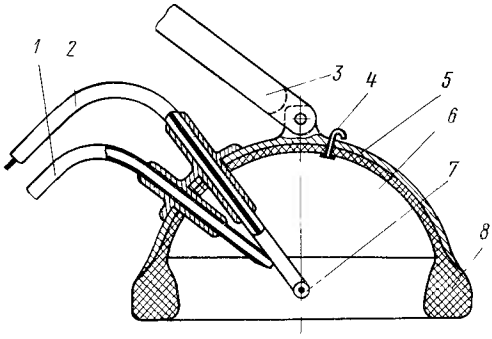


Рис. 4.4. Установка типа «швабра» для электрогидравлической очистки литья:
1 — шланг подачи воды; *2* — кабели электродов; *3* — рукоятка перемещения устройства, *4* — газоотводной патрубок; *5* — корпус чаши; *6* — полость, заполненная водой; *7* — концы электродов в рабочем искровом промежутке; *8* — эластичная резиновая фугеровка и обод чаши

Установки типа «швабра» (рис. 4.4) предназначены для электрогидравлической очистки поверхностей больших по массе (более 100—200 т) или размерам отливок и выполняются в виде чаши с одним или группой электродов внутри нее, в которую при работе непрерывно подается вода, заполняющая полость чаши [46]. Возникающие в чаше электрогидравлические удары при перемещении устройства по отливке отслаивают загрязнения и очищают плоскости громоздких отливок. Для удобства очистки отливки лучше всего устанавливать очищаемой стороной вверх, последовательно поворачивая их по мере очистки. Управлять перемещением чаши по поверхности отливки легче всего с помощью манипулятора обычного типа.

Разрушение стержней в таких крупногабаритных отливках осуществляется следующим образом. Отливка устанавливается на грунтовом полу цеха очищаемой полостью вверх, а затем в нее с помощью манипулятора вводится одиночный электрод с подачей воды через полость электрода. При обводе электрода по контуру стержня последний освобождается от связи с отливкой и вынимается краном. Различные боковые отверстия, через которые может вытекать вода, закрываются временными пробками и щитами. Вода в небольшом количестве, расходуемая на очистку таких отливок, стекает в ближайший люк канализации. Формовочная земля и стержни остаются на месте и удаляются обычными транспортными средствами. По мере очистки с одной стороны изделие поворачивается краном на другую сторону и очищается далее.

Установки автоматического типа [65] предназначены для электрогидравлической очистки изделий, выпускаемых большими партиями и обладающих рядом особенностей, делающих их очистку обычными средствами трудной или дорогостоящей. В качестве примера могут быть названы отливки крыльчатки автомобильного центробежного насоса с их сложными криволинейными внутренними полостями, электрогидравлическая очистка которых выполняется за 5—6 с и может быть автоматизирована.

Другим примером возможной автоматизации может быть очистка цоколей обычных осветительных электроламп от непра-

вильно нанесенного на них или разбитого изолятора с неправильно или плохо закрепленным на нем контактом. Непрерывно подаваемые по конвейеру и ориентированные изолятором вверх цоколи смогут очищаться без повреждения их формы. Отбитые куски изолятора, а также очищенные от него контакты возвращаются в производство.

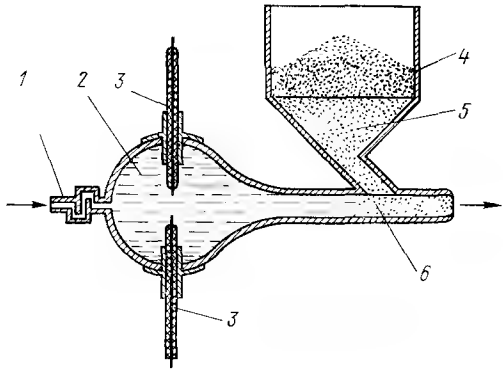


Рис. 4.5. Устройство мониторного типа электрогидравлической очистки литья:
1 — тормозной канал (подача воды); *2* — полость, заполненная водой; *3* — электроды; *4* — бункер для абразивных материалов; *5* — абразивный материал; *6* — абразивная «пробка»

Установки для очистки отливок такого типа конструируются применительно к каждому отдельному изделию или группе однотипных изделий.

Электрогидравлические установки мониторного типа [64] могут с успехом заменить существующие менее производительные установки для обычной гидроочистки литья. При этом замене подлежит лишь меньшая часть установки: гидромониторы обычной установки гидроочистки литья заменяются на электрогидравлические мониторы (рис. 4.5). Импульсная струя периодически выбрасывается из удлиненного сопла такого монитора и встречает на своем пути преграду, состоящую из старой формовочной земли и другого абразивного материала, постоянно и автоматически поступающего из бункера, который размещен над соплом монитора. Двигаясь по соплу, струя увлекает абразивный материал за собой и с силой выбрасывает его на отливку. В результате отливка интенсивно освобождается от формовочной земли, пригара и других загрязнений.

Электрогидравлическая очистка протяженных изделий [40, 54], например проката, проволоки, рельсов, может осуществляться в устройствах, выполненных в виде ванны, заполненной водой с абразивными добавками. В ванне расположены разрядники, снабженные отражателями. Прокат или другие изделия, непрерывно проходя через такую ванну, интенсивно очищаются в ней от разного рода загрязнений.

Непрерывная очистка длинномерных изделий может осуществляться и в электрогидравлических установках небольших размеров. Для этого в противоположных стенках рабочей камеры сделаны отверстия со съемными уплотнениями по форме очищаемых изделий, сквозь которые непрерывно проходит очищаемое изделие (рис. 4.6). Между электродами, размещенными в камере по периметру очищаемого изделия, и самим изделием непрерывно

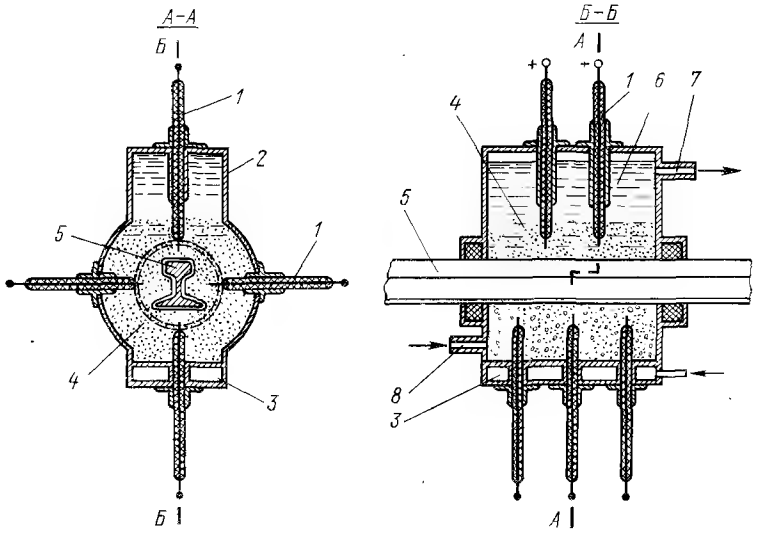


Рис. 4.6. Установка для непрерывной электрогидравлической очистки проката в кипящем слое:

1 — электрод; *2* — корпус устройства, *3* — полость для подачи воздуха, *4* — рабочая жидкость — вода с абразивом в кипящем слое; *5* — очищаемое изделие; *6* — рабочая жидкость выше кипящего слоя *7* — отвод воды со взвесью очищенной окалины; *8* — подача рабочей жидкости

возникают электрогидравлические удары, действие которых и очищает изделие.

Интенсивность очистки изделий на электрогидравлических установках всех типов можно повысить [21], если вводить в рабочую жидкость абразив и подавать через патрубки и отверстия в дне камеры воздух или воду для создания вокруг изделия «кипящего слоя».

Разработан метод, позволяющий осуществлять очистку литья не только от пригара, но и очистку самых разнообразных поверхностей изделий от всех видов покрывающих их загрязнений, налипаний, обрастаний, краски, окалины, ржавчины со сглаживанием неровностей на этих поверхностях. Метод основан на использовании предложенного способа получения коллоидов металлов [27] и может быть осуществлен для очистки каких-либо стандартных изделий (всех видов проката, проволоки, листов, рельсов), а также мелких (массой до 1 кг) изделий, в том числе и отливок.

Сущность метода заключается в следующем. В ванну, заполненную жидкостью, непрерывно поступают очищаемые изделия и засыпаются мелкие металлические опилки, а затем через перфорированное дно ванны подается вода или продувается воздух. В результате в ванне создаются условия «кипящего слоя». Импульсы тока (а в некоторых случаях и обычный переменный ток промышленной частоты) подаются на стенки ванны и изделие. Между

частицами опилок и изделием, контактирующим с ними, возникает множество микроскопических разрядов, превращающих верхний слой изделия (и особенно разного рода выступы на нем) в коллоидное вещество. Для того чтобы металлические частицы распределялись в жидкости равномерно и не слипались между собой, в жидкость одновременно вводятся непроводящие частицы, например стружки или опилки дерева, полиэтилена и т. д. [47, 53]. В результате изделие, проходя сквозь ванну, интенсивно очищается не только от всех видов загрязнений, но по сути дела и от своего поверхностного слоя. По этой причине стенки ванны необходимо выполнять (или футеровать) из какого-либо тугоплавкого вещества (например, твердого сплава, графита).

Электрогидравлическая установка, использующая этот метод, напоминает электрогидравлическую установку для получения коллоидов металлов [27] и состоит из ванны с перфорированным дном и патрубками для ввода и вывода рабочей жидкости (или газа), в которую погружен конвейер с закрепленными на нем очищаемыми изделиями. Процесс очистки может быть интенсифицирован, например, непрерывным вращением закрепленных на конвейере изделий.

Для очистки мелких изделий сложной конфигурации массой до 10 кг значительный интерес представляет очистка методом «воздушной кавитации». Конвейерные установки для электрогидравлической очистки изделий этим методом [43] выполняют в виде ванны с электродами, размещенными неглубоко под поверхностью воды. Сетчатый конвейер, несущий изделия, проходит как под электродами, где изделия очищаются общим для всех типов установок действием электрогидравлических ударов, так и над слоем воды, где изделия очищаются методом «воздушной кавитации». При этом вылетающие вверх массы жидкости, ударяясь об изделия, очищают их поверхность от разного рода покрытий или загрязнений, а удары масс воды интенсивно переворачивают мелкие изделия, подставляя их неочищенными сторонами под новые удары воды, выбрасываемой электрогидравлическими ударами.

Для повышения эффективности очистки этим методом рационально использовать способ утяжеления жидкости или ввести в состав жидкости какой-либо абразив [85].

В некоторых случаях целесообразно использовать метод «пузырьковой кумуляции» (см. рис. 2.17), который может быть рекомендован для повышения эффективности очистки на электрогидравлических установках всех типов, так как для его применения не требуется внесения серьезных конструктивных изменений. Например, конвейерная установка для электрогидравлической очистки изделий методом «пузырьковой кумуляции» может быть аналогична другим конвейерным установкам, но при этом дополнительно по дну рабочей ванны размещается труба с мелкими отверстиями для подачи воздуха, газа или пара [53, 65].

При осуществлении различных вариантов электрогидравлической очистки могут быть использованы и другие методы, расширяющие возможность использования электрогидравлического эффекта: радиактивный или лазерный поджиг разряда [63], а также метод теплового взрыва [23].

Повысить эффективность электрогидравлической очистки можно путем утяжеления рабочей жидкости различными добавками (тонкими суспензиями тяжелых металлов, соединений и др.). В частности, тонкоизмельченная пленка окислов железа или меди, все более насыщая рабочую жидкость, постепенно значительно утяжеляет ее [21, 85].

Также с целью повышения эффективности очистки отливок рекомендуется перед электрогидравлической обработкой стержневые и формовочные смеси насыщать влагой (так как пористые материалы, к которым они относятся, по мере увеличения содержания влаги теряют свою прочность). Кроме того, поскольку стержневые и формовочные смеси имеют многочисленные поры, то разряд, проходя через наполненные воздухом поры до тела отливки, создает не электрогидравлический, а только электропневматический удар, механический КПД которого в 800 раз ниже КПД электрогидравлического удара (по разнице плотностей воздуха и воды). Поэтому в начале очистки, пока формовочная земля и стержни отливки еще не пропитались водой, большинство разрядов имеют низкое значение механического КПД. Снижение механической прочности стержневых и формовочных смесей в результате насыщения их влагой перед электрогидравлической обработкой повысит механический КПД разрядов на начальной стадии очистки отливок, чем значительно улучшит технико-экономические показатели процесса в целом.

Электрогидравлическая очистка может быть рекомендована не только для обычного или прецизионного литья, но и для очистки материалов от самых разнообразных загрязнений (например, масложировых). Очистку здесь следует вести в ванне, заполненной каким-либо «мягким абразивом» (древесными или пластмассовыми опилками, которые, интенсивно перемещаясь вместе с жидкостью при каждом электрогидравлическом ударе, эффективно очищают изделия или объекты).

Весьма перспективной является электрогидравлическая очистка кузовов транспортных средств (вагонеток, кузовов автомобилей и железнодорожных вагонов) от налипшего на них или смерзшегося бетона, цемента и других трудно поддающихся очистке материалов. При транспортировании сыпучих грузов, руды, угля, цемента на рудниках, шахтах, при железнодорожных и автомобильных перевозках пыль и мелочь оседают на дно транспортных емкостей и слеживаются или смерзаются, образуя весьма прочную массу. При разгрузке эта масса не вываливается, а постепенно накапливаясь, уменьшает иногда до 15—20 % полезный объем транспортной емкости.

Установка для электрогидравлической очистки рудничных вагонеток может находиться за обычным рудничным опрокидывателем вагонеток. Процесс электрогидравлической очистки осуществляется следующими образом. Состав проходит опрокидыватель и разгружается, но в вагонетках еще остаются налипшие на пол и стенки слежавшиеся сыпучие материалы (штыб). Продвигаясь вперед, вагонетка отводит в сторону блок-контакт и гидрант наполняет ее водой до заданного уровня. Далее, по мере разгрузки состава, вагонетка, продвигаясь, нажимает на контакт, служащий для ее заземления и блокирования высоковольтной установки, таким образом, что установку включить при разомкнутом контакте невозможно. Одновременно с этим контакт управляет подачей электрода по вертикали. Так как на каждом руднике применяют обычно один тип вагонеток, то подача электрода на нужную величину вниз и вывод его вверх через определенные промежутки времени легко поддаются автоматизации и программированию.

Как только электрод занял рабочее положение, включается высоковольтная установка и между торцом электрода и стенками вагонетки, являющимися вторым отрицательным электродом, происходит разряд и возникает электрогидравлический удар. Энергией электрогидравлического удара и производится очистка вагонетки от налипшего штыба. Очищенная вагонетка, наполненная пульпой штыба и воды, подводится к опрокидывателю и опорожняется от пульпы. Далее вагонетка следует очищенной. Шлак из шлакосборника самотеком или при помощи насоса поступает в бункер. Такая схема позволяет производить непрерывную очистку подвижного состава без его расцепки. Для управления и контроля за работой установки служит пульт управления. Аналогично может осуществляться очистка кузовов автомашин и железнодорожных вагонов.

Электрогидравлическую очистку крупных металлических сооружений (например, судов от покрывающей их ржавчины, краски или обрастания морскими организмами) можно осуществлять устройствами типа «швабра» после ввода их в док [46].

Особый интерес представляет очистка судов от обрастания «на плаву», без постановки в док. Такая очистка может вестись как в пресной, так и в соленой воде [97], причем в последнем случае в каждую «швабру» (чашу) общего устройства электрогидравлической очистки дополнительно подается по шлангам пресная вода. Отдельные чаши этого устройства закреплены на длинных штангах-троллеях (рис. 4.7). Судно, медленно продвигаясь, входит в устройство, состоящее из двух рядов свай по ширине судна с укрепленными на них троллеями, несущими чаши. При передвижении судна электрогидравлические «швабры», взаимно перекрывая друг друга, огибают весь контур судна от киля до ватерлинии с каждой его стороны, повторяют все обводы судна и очищают корпус от всех видов обрастания.

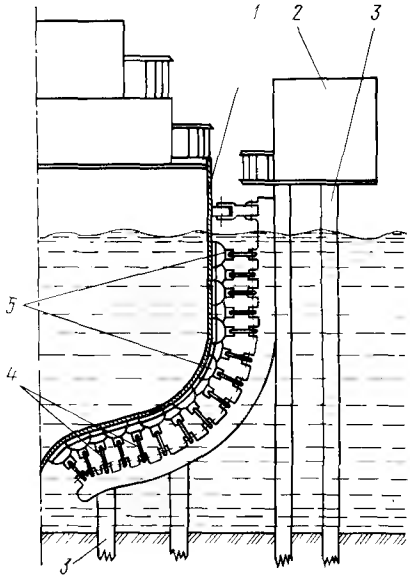


Рис. 4.7. Установка для электрогидравлической очистки судов от обрастания на плаву:
1 — корпус судна; *2* — помещение для блока конденсаторов; *3* — сваи; *4* — троллеи очистных чаш, *5* — чаши очистных устройств

Режим очистки подбирается таким, чтобы окраска судна практически не страдала. Исключение составляет кормовая часть судна (около винта и руля), очистка которой подобным устройством затруднительна. Эта часть судна очищается обычными средствами.

Электрогидравлическая обработка может использоваться и при всякого рода вспомогательных операциях, имеющих прямое или косвенное отношение к очистке литья.

Используя электрогидравлическое устройство, приведенное на рис. 4.8, можно осуществить интенсивное уплотнение литейных форм без применения сложных машин, расходования большого количества сжатого воздуха, а главное - без сотрясения машин и зданий [76]. Этим методом можно уплотнять не только опоки и другие литейные формы, но и любые формы вообще (строительные, скульптурные и др.).

Широкое применение корковых или оболочковых форм вызывает необходимость в их уплотнении. Уплотнение может быть произведено тепловым взрывом ВТЭ путем размещения взрывающегося теплового элемента внутри оболочки и обжатия ее по форме электропневматическим действием взрыва, усиленного при необходимости какими-либо добавками к ВТЭ.

Хорошие результаты дает и электрогидравлическая регенерация формовочных земель. Формовочная земля любого состава, пропущенная через обычную электрогидравлическую дробилку песчаного типа с выходными отверстиями, в 2—3 раза бо́льшими, чем максимальный диаметр частиц, входящих в данный формовочный состав, оказывается полностью освобожденной от обволакивающего ее частицы связующего или склеивающего состава. Это позволяет легко разделить их. Как показал опыт, формовочный песок при этом практически не измельчается, потери его ничтожны и он путем обычной промывки легко отделяется затем от всех связывающих его веществ.

Регенерация формовочных земель осуществляется, во первых, за счет резко выраженной избирательности действия электрогидравлического удара, быстрее измельчающего хрупкие и медленнее - вязкие материалы, и, во вторых, за счет резонансного

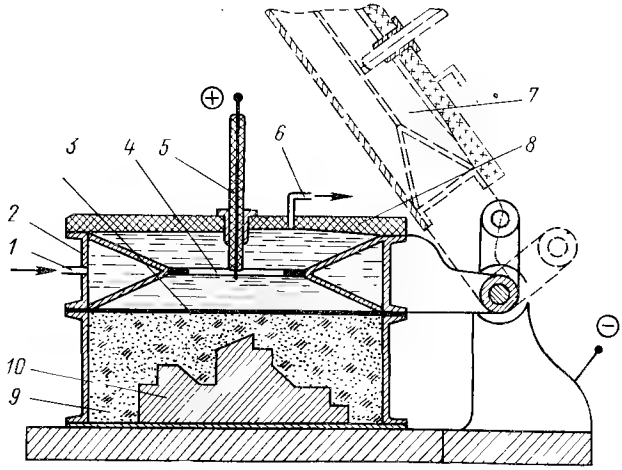


Рис. 4.8. Электрогидравлическое устройство для уплотнения литейных форм:

1 — подача жидкости, *2* — корпус электрогидравлического вибратора; *3* — резиновая мембрана; *4* — отрицательный кольцевой электрод; *5* — положительный электрод; *6* — вывод газов, *7* — положение вибратора при съеме и установке опоки, *8* — диэлектрическая крышка, *9* — формовочная земля, *10* — формуемая модель

действия электрогидравлического эффекта [42], тем легче отслаивающего друг от друга компоненты, имеющие различную собственную частоту колебаний, чем более велика разница этих частот [6].

4.2. Электрогидравлическое снятие внутренних напряжений (старение материалов)

Опыт показал, что электрогидравлические установки для очистки литья способны осуществлять одновременно с очисткой интенсивное старение — снятие внутренних напряжений в металлах и других материалах [3, 6]. Как оказалось, эти напряжения достаточно эффективно снимаются уже в процессе самой электрогидравлической очистки литья, а если процесс электрогидравлической обработки продолжить, то напряжения могут быть сняты практически полностью. Расход энергии на полное снятие напряжений может составить около 50 –100 кВт·ч на 1 т литья.

Снятие напряжений может быть осуществлено и методом теплового взрыва. Снятие напряжений тепловым взрывом может оказаться единственно возможным способом осуществления этой операции в тех случаях, когда воздействие электрогидравлическим ударом, сформированным искровым разрядом на объект очень сложной формы, не может быть осуществлено. В этом случае используют ВТЭ, способные занять любое положение в любом необходимом месте.

Известный метод снятия напряжений с помощью механических ударов по изделию аналогичен процессам, происходящим и при осуществлении электрогидравлического старения. Очевидно, что этим способом может выполняться старение не только металлов, но и любых других материалов.

Для старения ферромагнитных (а при наведении в них токов Фуко- и всех токопроводящих) материалов предложен также метод обработки достаточно мощным импульсным магнитным полем переменной полярности, а в некоторых случаях и обычным током промышленной частоты. При этом от интенсивного перемагничивания структурных элементов металла (или от взаимодействия магнитного поля токов Фуко), возникающего в элементах с магнитным полем перемагничивающих импульсов, происходит механическое перемещение элементов этих структур, а следовательно, и изменение взаимного расположения, приводящее сначала к уменьшению, а затем и к полному устранению внутренних напряжений в данном материале.

Для осуществления этого метода изделия подвергают электромагнитной обработке, либо пропуская их через полость соленоида с импульсным или обычным переменным током, либо обводя их поверхность плоской катушкой с током. При этом импульсные токи, циркулирующие в катушках соленоидов, не должны быть униполярными и апериодическими, но каждый импульс их должен содержать хотя бы одну полную волну или же форма импульса должна быть колебательной, что легко достигается регулированием формирующего разрядника (в случае, если применяется электрогидравлическая установка). Процесс старения обычным током промышленной частоты ввиду относительно малой мощности каждого периода тока будет менее интенсивным, чем тот же процесс, осуществляемый мощными импульсами тока от электрогидравлической установки, работающей в колебательном режиме разряда. Тем не менее, использование вращающегося магнитного поля позволяет во многих случаях резко повысить эффективность процесса старения током промышленной частоты, доводя его показатели до значений, сравнимых с импульсным воздействием.

4.3. Электрогидравлическая штамповка металлов

Уже первые опытно-промышленные электрогидравлические установки показали очевидную рациональность штамповки деталей из плоских и цилиндрических заготовок. В дальнейшем оказалось, что электрогидравлическим способом можно штамповать детали любых форм и размеров. В настоящее время на основе накопленного отечественного и зарубежного опыта электрогидравлическая штамповка применяется весьма широко [6, 19, 23, 59]. В СССР создано несколько типов промышленных электрогидравлических установок для штамповки деталей, внедрение которых позволило существенно повысить (в 5—10 раз)

производительность труда, упростить производство, снизить металлоемкость и стоимость оборудования при повышении качества и надежности изделий и получить значительный экономический эффект. Электрогидравлические прессы моделей «Удар-1», «Удар 11», «Удар 12м», «Удар-14», «Удар-20», Т 1220, Т-1223, Т-1225, Т-1228, Т-1231, ПЭГ-25, ПЭГ-60М, ПЭГ-100Н, ПЭГ-150 и другие с энергией единичного импульса от 10 до 150 кДж при напряжении 10—50 кВ способны штамповать заготовки размерами до 2400 мм при толщине до 10 мм. Серийное производство электрогидравлических прессов налажено на Опытном заводе ПКБ электрогидравлики АН УССР и на других машиностроительных заводах. Внедрение каждой электрогидравлической установки для листовой штамповки дает экономию в среднем 25—50 тыс. руб. в год. А таких установок в СССР внедрено уже несколько сотен. Много установок для электрогидравлической штамповки работают и за рубежом.

В настоящее время наиболее эффективной областью применения листовой электрогидравлической штамповки является формообразование и калибровка конических и цилиндрических оболочек диаметром до 1200 мм при высоте до 1100 мм из заготовок толщиной до 5 мм. Продолжается расширение диапазона толщин и габаритных размеров изделий, выполняемых электрогидравлической штамповкой, зависящее как от параметров генераторов импульсов тока, так и от совершенства конструкции технологического узла.

Известные способы штамповки, вытяжки, гибки и выполнения других операций деформирования листовых пластических материалов предусматривают применение гидравлических или механических прессов, в которых давление жидкости создается при помощи насосных или компрессорных установок. Электрогидравлический способ штамповки [59] предусматривает осуществление этих технологических операций электрогидравлическими ударами, создаваемыми в открытой или замкнутой камере, днищем, стенкой или крышкой которой служит обрабатываемый материал. Электрогидравлические удары осуществляются при разрядах между электродами и обрабатываемым материалом или между двумя электродами. Обрабатываемый листовой материал под действием электрогидравлического удара вдавливается в матрицу и тем самым приобретает ее форму.

Устройство для электрогидравлической штамповки и других операций [59] (рис. 4.9, *а*, *б*) выполнено в виде матрицы с полостью, заполненной воздухом или находящейся под вакуумом. Крышкой полости служит деформируемый листовой материал. Над деформируемым листом (или под ним, если применяют способ штампования «вверх») расположена камера с рабочей жидкостью и рабочими электродами. Разряд осуществляется между двумя электродами (рис. 4.9, *а*) или между электродом и деформируемым листом (рис. 4.9, *б*).

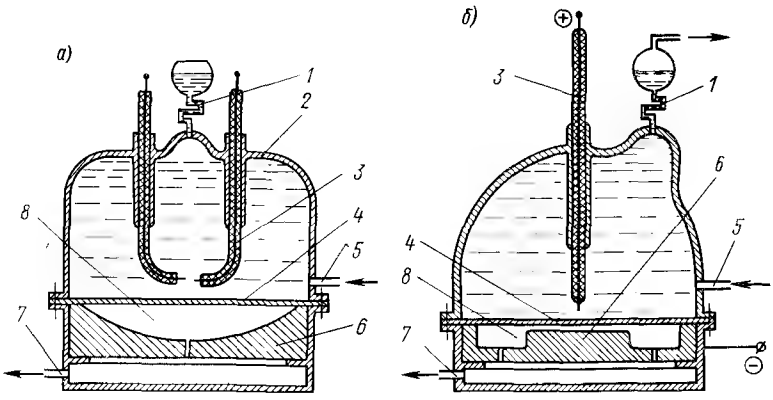


Рис. 4.9. Устройства для электрогидравлической штамповки искровым разрядом с двумя (*а*) и одним (*б*) электродами:
1 — тормозной канал с ресивером; *2* — литой корпус устройства; *3* — электроды; *4* — штампуемый лист; *5* — подача воды; *6* — матрица; *7* — патрубок вакуумного насоса, *8* — вакуумируемая полость

Все типы эксплуатируемых в промышленности отечественных и зарубежных установок для электрогидравлической листовой штамповки основаны на описанных выше принципиальных способе и устройстве.

Электрогидравлическая штамповка искровым разрядом. Электрогидравлическую штамповку металлов можно осуществлять как на низком, так и на высоком напряжениях. Удобства накопления больших энергий и коммутации больших токов на высоком напряжении общеизвестны. Но в современных условиях высокая стоимость и громоздкость высоковольтных конденсаторов зачастую заставляют отказываться от дальнейшего повышения рабочего напряжения установок электрогидравлической штамповки выше некоторого предела (в 100—150 кВ), определяемого в основном только массой и объемом выпускаемых промышленностью конденсаторов. Однако дальнейшее повышение рабочего напряжения при электрогидравлической штамповке представляется крайне перспективным.

Принципиально при электрогидравлической штамповке нет необходимости в увеличении крутизны фронта и уменьшении длительности импульса, поскольку штамповка выполняется в основном за счет энергии запаздывающего потока, которая относительно больше на мягких, чем на жестких, режимах. Но более быстрый рост механического КПД разряда, возникающий вместе с ростом напряжения, приводит к тому, что при прочих равных условиях работа на высоких напряжениях, как правило, оказывается в общем энергетически и экономически более оправданной.

При электрогидравлической штамповке осуществляется один или несколько одновременных или незначительно сдвинутых по

времени искровых разрядов на соответствующим образом размещенных и ориентированных парах или группах рабочих разрядников. При этом штамповку всегда стремятся осуществить за один прием, без переналадок установки. Одновременное или незначительно сдвинутое по времени осуществление нескольких разрядов на рабочих искровых промежутках штампующих устройств часто оказывается более целесообразным, чем серия одиночных или групповых разрядов с большой частотой чередования.

В некоторых случаях для обеспечения непрерывности течения деформируемого материала целесообразен подбор такого чередования электрогидравлических ударов на группе управляемых рабочих искровых промежутков, чтобы каждый последующий удар, возникающий в камере штамповки, был строго дозирован не только по величине своей энергии, но и по частоте следования. Подобный подбор оптимальных энергии и частоты следования импульсов, а значит, и оптимальной скорости и характера деформации материала особенно важен для штамповки легированных и других труднодеформируемых материалов.

Значительный технологический эффект дает и использование метода ступенчатой подачи энергии на разрядный промежуток, позволяющее совмещать достоинства работы на относительно низких напряжениях с достоинствами работы на высоких напряжениях (см. гл. 2). Этот метод также позволяет управлять характером течения и скоростью деформирования обрабатываемого материала. При этом на рабочий искровой промежуток, расположенный в камере электрогидравлической штамповки, сначала подается импульс высокого напряжения, но малой энергии, достаточный для пробоя данного рабочего промежутка и создания электрогидравлического удара, позволяющего перевести обрабатываемый материал за предел текучести, но недостаточный для осуществления всей работы деформации и полного изготовления изделия. Затем через короткий, регулируемый по длительности промежуток времени на возникший в жидкости канал разряда подается импульс низкого напряжения, но большой энергии, достаточный для завершения всей работы по штамповке уже текущего материала. Этот метод позволяет использовать относительно низковольтные конденсаторы и питающие установки, менее громоздкие и не столь дорогие, как соответствующие им по мощности и энергии высоковольтные установки [3, 6].

В этих же целях для осуществления электрогидравлической штамповки искровым разрядом на относительно низких напряжениях может быть использован и метод радиационного поджига (см. рис. 2.5), когда искровой разряд относительно низкого напряжения направляют либо по возникающему синхронно с чередованием разрядов ионизированному каналу, образованному лучом импульсного лазера, либо по лучу проникающего излучения, идущего из капсулы, устанавливаемой, как и лазер, на одном

(преимущественно заземленном) отрицательном электроде или группе электродов [63].

Главным достоинством деформации искровым разрядом является возможность сколь угодно часто повторять разряды на данном устройстве без всякого изменения или переналадки его. Так, при штамповке изделий больших площади, толщины или диаметра деформация их может осуществляться одномоментным или синхронно повторяющимся действием большого числа разрядов, возникающих на ряде рабочих искровых промежутков, размещенных в камере штамповки. Одновременность создания электрогидравлических ударов на каждой паре рабочих электродов может быть достигнута обычным способом (например, поджигом). В местах наиболее сложного профиля изделий или особенно глубоких вытяжек рекомендуется устанавливать дополнительные разрядники. Специальные разрядники могут быть установлены и в местах образования отверстий, резких изгибов или впадин изделия.

Штамповка сложных изделий большой длины может также осуществляться и последовательным перемещением над изделием всего лишь одного разрядника, разряды которого и формуют изделие. При этом над местами сложного профиля или глубокой выемки перемещаемый разрядник может задерживаться. С той же целью второй электрод рабочего искрового промежутка может быть выполнен, например, в виде кольца, и тогда разряд будет обегать окружность, т. е. вращаться. Последовательное вращательное движение разряда может быть достигнуто также и вращением отогнутого Г-образного конца центрального электрода или при осуществлении разряда между электродом и токопроводящей сеткой, расположенной вблизи поверхности обрабатываемого материала.

Для производства гибочных и других операций обрабатываемый материал деформируют через покрывающий его эластичный (например, резиновый) лист со многими проходящими сквозь него токопроводящими контактами [59].

При электрогидравлической штамповке во избежание обратной деформации изделий в полости матрицы под штампуемым листом должен быть создан обязательный в этом случае вакуум, а камера штампования, заполненная жидкостью, должна быть герметизирована и в ней обычными средствами создано избыточное давление. Вакуум под изделием и избыточное давление в камере штамповки рекомендуются во всех случаях штамповки тонких листов при достаточно большой площади изделия.

Частицы воздуха, заполняющие камеру матрицы под листом, несмотря на достаточно хорошее вакуумирование ее, оказывают движению листа заметное сопротивление, поскольку не успевают быстро удалиться из узкого пространства между изделием и стенкой матрицы (так как скорость взаимного сближения листа и матрицы очень высока). Поэтому частицы воздуха, неизбежно

остающиеся между изделием и матрицей, вызывают неполное прилегание изделия к матрице в процессе штамповки, а это не позволяет получать изделия с точными размерами, поскольку число этих «остатков» все время изменяется, вызывая нестабильность размеров получаемых изделий. Попытки устранения этого явления сверлением большого числа выводных отверстий или повышением вакуума не приводят к желаемым результатам.

Однако, если внутреннюю стенку матрицы выполнить либо мелкопористой, либо покрыть густой сеткой перекрещивающихся рисок или царапин, то при быстром сближении изделия и матрицы в эти поры и риски на время плотного прилегания и удалятся все оставшиеся частицы воздуха [69]. В результате отштампованное изделие плотно прилегает к стенке матрицы, а затем в силу собственной упругости незначительно отходит от нее и по существу совершенно не испытывает демпфирующего действия остатков воздуха, свободно перетекающего теперь сквозь поры или каналы рисок в объем камеры матрицы. Применение такой конструкции матрицы позволяет существенно повысить точность размеров штампуемых изделий и выполнять такие точные работы, как калибрование изделий с достаточно высокими допусками.

Поскольку при разрядах в камере штамповки из жидкости могут выделяться растворенные или образовавшиеся в ней газы, демпфирующие электрогидравлические удары и снижающие эффективность штамповки, то для постоянного их удаления в верхней части камеры устанавливают ресивер, соединенный тормозным каналом с полостью камеры [6]. Несколько кривоколенных изгибов тормозного канала полностью глушат ударную волну и устраняют перепады и толчки давления между ресивером и камерой, не позволяя газам, находящимся в ресивере, демпфировать электрогидравлические удары в камере. Спускной кран ресивера позволяет периодически удалять скопляющийся газ наружу.

При электрогидравлической штамповке расширяющаяся кавитационная полость (развивающаяся аналогично как при искровом разряде, так и при тепловом взрыве) преодолевает при расширении не только сопротивление жидкости, но и сопротивление атмосферного давления. Учитывая большую поверхность кавитационной полости и высокую скорость ее расширения, следует признать, что энергия, бесполезно расходуемая на преодоление этого сопротивления, весьма велика и что его устранение или уменьшение может резко повысить эффективность штамповки. Для этого в камере штамповки над изделием создается небольшой (меньше, чем в полости матрицы под изделием) вакуум. При этом вакуум в камере штамповки подбирается таким, чтобы жидкость не закипала [89]. Устройство для реализации описанного метода приведено на рис. 4.10.

Эффективность штамповки можно повышать также и путем устранения или уменьшения бесполезных для процесса штамповки усилий, возникающих при захлопывании кавитационных полостей.

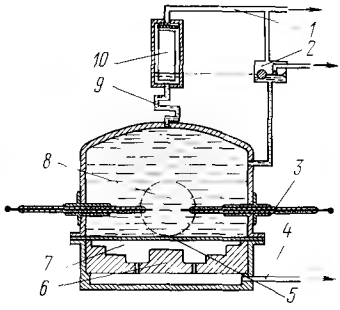


Рис. 4.10. Устройство для электрогидравлической штамповки с устранением противодавления:

1 — трубопровод к вакуумному насосу; *2* — поплавковый регулятор уровня жидкости в камере штамповки, *3* — электрод, *4* — патрубок к вакуумному насосу; *5* штампуемый лист; *6* матрица; *7* — вакуумируемая полость матрицы; *8* кавитационная полость разряда; *9* тормозной канал; *10* — ресивер с окном для наблюдения за уровнем жидкости

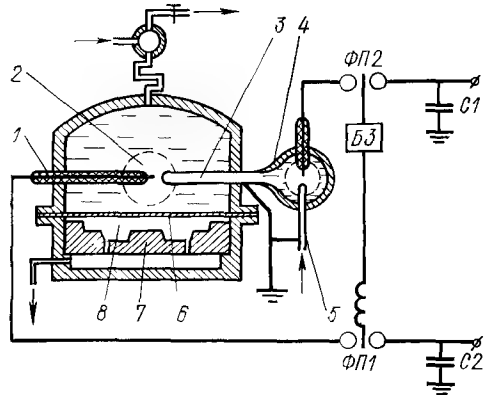


Рис. 4.11. Устройство для электрогидравлической штамповки методом заполнения полости (*ФП1* — формирующий промежуток основного устройства; *ФП2* — управляемый от *ФП1* формирующий промежуток электрогидравлического насоса; *БЗ* блок запаздывания срабатывания насоса):

1 — положительный электрод; *2* кавитационная полость, *3* — полый отрицательный электрод; *4* — электрогидравлический насос; *5* — полый электрод насоса для автоматического засасывания жидкости, *6* — штампуемый лист; *7* матрица; *8* вакуумируемая полость матрицы

Для этого в момент расширения кавитационной полости непосредственно в эту полость принудительно или, используя существующий в ней вакуум, вводят рабочую жидкость (рис. 4.11). Принудительную подачу жидкости можно осуществлять, например, посредством электрогидравлического насоса, сообщенного с рабочей камерой через полый электрод. В результате стенкам полости, захлопывающейся после расширения, уже не нужно проходить весь путь, поскольку часть полости (или даже весь ее объем) уже заполнена жидкостью. Таким образом, затраты энергии на этот процесс устраняются и в жидкости сохраняется высокое давление, что облегчает получение при следующем разряде еще бóльших давлений.

При штамповке крупных изделий в качестве среды, подаваемой в кавитационную полость, может использоваться и сжатый газ, получаемый, например, от взрыва взрывчатого вещества (ВВ). При подаче газа с давлением, близким к давлению жидкости на стенках полости, в момент максимального ее расширения смыкающиеся стенки полости сжимают и находящийся в полости газ и аккумулируют энергию сжатия полости. Наибольший эффект достигается при подаче газа с давлениями, бóльшими, чем давления на стенках полости. При этом полость, практически не смыкаясь, продолжает расширяться до пределов, определяемых

запасом энергии газа (задаваемой, например, зарядом ВВ). В результате появляется возможность деформировать металл, уже переведенный за предел текучести первоначальным действием электрогидравлического удара, и тем самым резко повысить общий эффект штамповки [72].

Для штамповки длинных каналов, вырубки протяженных отверстий или других подобных работ может быть использован метод «бегущей волны» (рис. 4.12). При этом заданное по времени чередование искровых разрядов или тепловых взрывов, располагающихся по длине образуемого канала или отверстия, осуществляет последовательную деформацию определенного участка изделия.

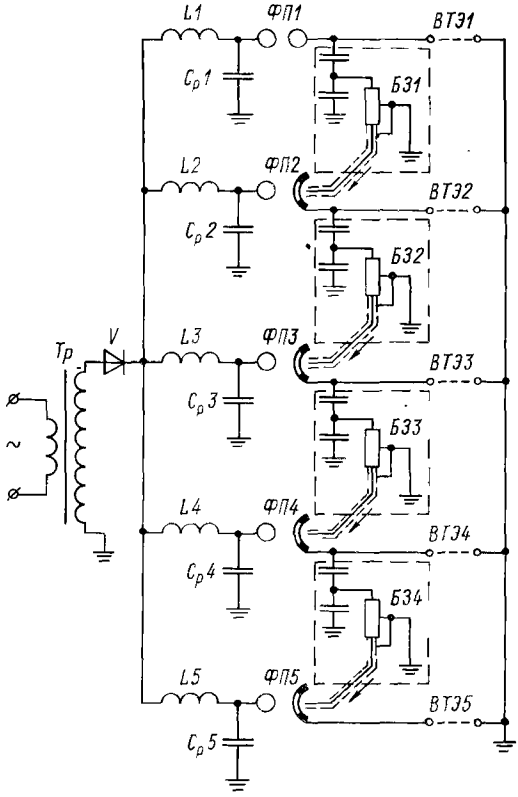


Рис. 4.12. Принципиальная схема устройства для штамповки методом «бегущей волны» (*L1—L5* – ограничивающие индуктивности отдельных зарядных контуров; *Cр1—Cр5* рабочие конденсаторы зарядных контуров; *ФП1* управляющий формирующий промежуток первого зарядного контура; *ФП2—ФП5* — управляемые (поджигом) формирующие промежутки отдельных контуров; *Б31—Б34* блоки запаздывания поджига последовательно включающихся разрядных контуров; *ВТЭ1—ВТЭ5* – проволочные ВТЭ)

Метод «бегущей волны» [6], применяемый в некоторых электрогидравлических устройствах, позволяет одновременно с обработкой осуществить и непрерывное перемещение материала в заданном направлении.

Практикой доказано, что при электрогидравлической штамповке много времени отнимают установка на матрице штампуемого листа и снятие с нее готового изделия. При этом во многих электрогидравлических штамповочных устройствах приходится тратить много времени на освобождение от жидкости рабочей камеры и последующее наполнение ее. Однако непроизводительные затраты времени (например, при штамповке зигов на больших листах металла) могут быть сведены к минимуму путем использования метода передвижного «стакана», внутри которого распо-

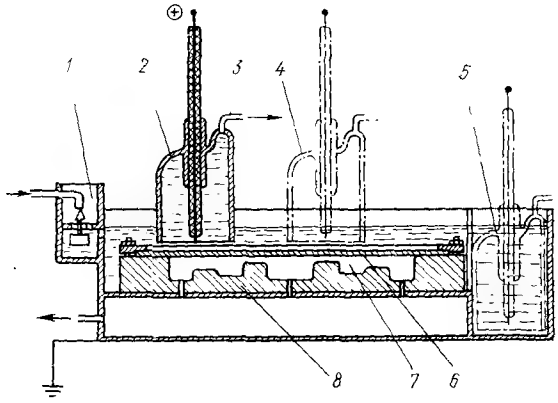


Рис. 4.13. Установка для электрогидравлической штамповки листовых изделий методом «стакана»: *1* – поплавковый регулятор уровня жидкости; *2* – корпус «стакана»; *3* – патрубок отсоса жидкости; *4* – перемещение «стакана» в процессе штамповки; *5* – положение «стакана», заглубляемого в приямок при съеме готового и установке нового изделия; *6* – штампуемый лист, *7* – вакуумируемая полость матрицы; *8* – матрица

ложен штампующий электрод. Лист металла располагают на матрице под тонким слоем жидкости, покрывающей края отверстия перевернутого «стакана», что препятствует вытеканию жидкости, заполняющей «стакан», в котором происходит процесс электрогидравлической штамповки (рис. 4.13).

Для постоянного удаления демпфирующих процесс газов и пополнения воды жидкость вместе с образовавшимися газами непрерывно (хотя и в очень малом объеме) удаляется через верх «стакана», а уровень жидкости в ванне штамповки поддерживается постоянным обычными средствами. При использовании этого метода для снятия готового изделия и установки нового листа необходимо только опустить «стакан» в специальное углубление у края ванны и понизить уровень воды в камере до уровня листа [6].

Для многих электрогидравлических установок с верхним расположением камеры штамповки целесообразно отделять ее от штампуемого листа и вакуумируемой камеры матрицы с помощью какого-либо эластичного листа, герметизирующего полость камеры штамповки и не позволяющего жидкости вытекать при ее подъеме для снятия отштампованного изделия и установки нового листа.

Кроме приведенных здесь вариантов выполнения устройств электрогидравлической штамповки, позволяющих резко сократить время на вспомогательные работы, могут быть предложены и другие варианты, сводящие до минимума непроизводительные затраты времени. Так, при выполнении операций, связанных с увеличением размера трубчатых изделий раздачей или раздуванием, разряды следует воспроизводить вблизи геометрического центра раздаваемого изделия. Если же операция связана с обжатием изделия, то разряды осуществляют по внешней стороне обжимаемого контура. В случае невозможности осуществления таких разрядов операцию производят методом теплового взрыва.

Электрогидравлическая штамповка тепловым взрывом. Как показал опыт отечественного и зарубежного промышленного применения электрогидравлического эффекта, штамповка тепловым взрывом является наиболее перспективным методом [6, 23, 59]. При этом в камере штамповки в жидкости между рабочими электродами искровой разряд заменяется электрически соединенным с электродами взрывающимся тепловым элементом, выполненным из проводящей проволоки, ленты или объемного контура. Сущность метода, его преимущества и различные варианты его применения подробно изложены в гл. 2.

Применение метода теплового взрыва значительно расширяет возможности электрогидравлической штамповки, практически не усложняя (а во многих случаях даже упрощая) конструкцию устройств. Принципиально нет такой области электрогидравлической обработки дефомацией, где метод теплового взрыва непосредственно или через свои модификации не мог бы быть с успехом использован. В то же время все методы и устройства, повышающие эффективность электрогидравлической штамповки применительно к штамповке искровым разрядом, применимы и к штамповке методом теплового взрыва.

Штамповка методом теплового взрыва может осуществляться как с использованием ВТЭ одноразового действия, так и при непрерывной подаче ВТЭ. Для электрогидравлической штамповки изделий сложного профиля одноразовый проволочный ВТЭ может быть изогнут по заданному оптимальному профилю, а при использовании изогнутого ленточного ВТЭ может быть получена кумулятивная струя с локально направленным действием. Значительный эффект дает использование ВТЭ в виде двух состыкованных конусов и трубчатых ВТЭ, а также метода заданной концентрации и распределения энергии с помощью ВТЭ (см. рис. 2.9).

Различным расположением в камере для электрогидравлической штамповки переменных по форме и диаметру ВТЭ методом заданной концентрации энергии можно достичь наперед заданного распределения выделения энергии в каждой точке пространства этой камеры и, таким образом, наиболее эффективно отштамповать изделия самой сложной формы. Например, если расположить ряд проволочных ВТЭ в виде «звезды» (рис. 4.14) с питанием каждого ВТЭ от самостоятельного разрядного контура, то при одновременном тепловом взрыве их в центре деформируемого изделия выделение энергии бу

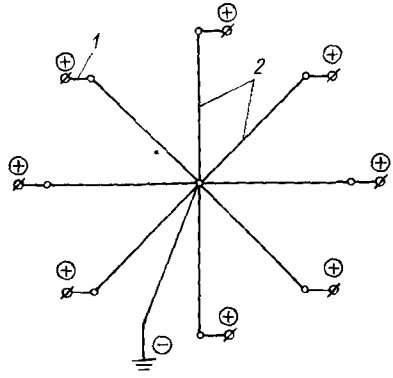


Рис. 4.14. Схема ВТЭ в виде «звезды» с прямыми лучами:
1 — токопровод, *2* — проволочные ВТЭ

дет максимальным, плавно убывающим к его краям, что обеспечит бо́льшие деформацию и скорость течения металла центральным частям изделия. Если «вершину» этой «звезды» поднять или опустить относительно ее краев или горизонтальной плоскости, то характер деформации изделия резко изменится: при подъеме «вершины» концентрация энергии в центре изделия станет ослабевать, а при опускании ее, наоборот, — усиливаться. Закручивание лучей «звезды» по дугам в горизонтальной плоскости приведет к более равномерному распределению энергии по поверхности изделия (например, днища), а аналогичное изгибание лучей в вертикальной плоскости — к резкому ослаблению воздействия на центр изделия с усилением его у краев. В тех случаях, когда на каком-либо конкретном изделии необходимо получить длинную впадину, пробитое отверстие или четкий угол изгиба, следует над этой впадиной (будущим отверстием) или изгибом сконцентрировать с заданной плотностью проволочный или ленточный ВТЭ [6].

В отдельных случаях электрогидравлической штамповки возможно применение пастообразного ВТЭ. Применение в качестве ВТЭ каких-либо неионопроводящих жидкостей, непосредственно впрыскиваемых в рабочий искровой промежуток, возможно, но нецелесообразно, поскольку подобная жидкость, непрерывно растворяясь в рабочей жидкости, вызывает быстрое повышение ее проводимости, а следовательно, если рабочую жидкость непрерывно не заменять, — быстрое увеличение потерь на проводимость, снижающих общий КПД электрогидравлической штамповки.

Введение в рабочий искровой промежу́ток камеры электрогидравлической штамповки мелких пузырьков воздуха, в какой-то мере «направляющих» разряд, не может быть рекомендовано, так как наличие таких пузырьков либо демпфирует действие электрогидравлических ударов, ослабляя их, либо влияет на вакуумный или, наоборот, напорный режим камеры штамповки. Поэтому в качестве газа для реализации данного способа, можно использовать пар (или гремучий газ), который образует пузырьки, существующие только во время разряда и без последствий исчезающие вместе с ним.

Штамповать изделия с помощью теплового взрыва можно не только в воде, но и в любой жидкости, даже в сильном электролите или расплаве соли или металла. Деформировать металлы можно и в газовой среде [20], здесь в отличие от искрового разряда тепловой взрыв можно осуществить в газах любых состава и температуры (в том числе в плазме).

Комбинированные методы штамповки. В некоторых случаях применяют штамповку, при которой трубчатый ВТЭ заполняется каким-либо веществом или материалом, образующим после теплового взрыва ВТЭ большое количество газа либо создающим высокую температуру. Это добавочное воздействие в комплексе с действием ВТЭ создает новый метод, позволяющий получить за мощным

пиком давлений от теплового взрыва ВТЭ второй, менее мощный, но более длительный импульс давления, вызывающий продолжительное течение и бо́льшую деформацию металла, уже начавшего свое течение после взрыва ВТЭ.

Как известно, для достижения свободного течения металла необходимо перейти некоторый порог давлений, за которым металл начинает течь без дальнейшего увеличения действующих усилий. С началом течения металла действующие усилия могут быть значительно снижены без ущерба для эффективности процесса его течения. Однако механические устройства, которые бы совершили комплекс этих действий автоматически, отсутствуют. Отсюда понятен интерес к подобного рода процессам и методам, позволяющим достаточно простыми средствами решить эту сложную задачу.

Наиболее рациональным вариантом такого метода обработки материалов (например, штамповки) является метод комбинированной обработки [72], сущность которого состоит в том, что в объеме герметизированной камеры штамповки над изделием сначала обычными средствами создают электрогидравлический искровой разряд или тепловой взрыв, а затем через управляемый и регулируемый промежуток времени осуществляют взрыв дозированного количества обычного взрывчатого вещества. При этом действием электрогидравлического удара металл изделия оказывается переведенным за предел текучести, а начавшееся течение металла продолжается действием давлений взрыва и изделие, как бы велико оно не было, деформируется на заданную величину.

В различных вариантах устройств, использующих этот метод, предусматривается подача твердого, пастообразного, жидкого или газообразного ВВ через один из электродов (преимущественно через заземленный).

Комбинация обоих методов обработки, резко уменьшая и количество ВВ, и размеры электрогидравлической установки, необходимые для выполнения заданной работы деформации, позволяет штамповать крупногабаритные изделия за один прием. При этом совмещаются достоинства обоих методов и полностью устраняются недостатки, присущие каждому методу в отдельности. В качестве жидкой среды здесь целесообразно использовать жидкость с высокими плотностью и вязкостью, которая позволяет удерживать поданное в нее ВВ в заданном месте.

В некоторых случаях используют совмещенный метод обработки, осуществляемый комбинацией искровых электрогидравлических разрядов и тепловых взрывов, производимых одновременно или порознь (в том числе и через регулируемые промежутки времени) в камере штамповки. При этом над теми местами изделия, где требуется особенно мощное воздействие, размещаются ВТЭ, а общая деформация изделия выполняется с помощью искрового разряда [72].

Магнитогидравлическая штамповка представляет собой комбинацию магнитоимпульсного и электрогидравлического воздействий на материал. Широкоизвестная магнитоимпульсная обработка (например, штамповка металлов) имеет весьма низкий КПД (в 3 раза меньший, чем КПД электрогидравлической штамповки). В целях повышения эффективности магнитоимпульсной обработки разработан метод, при котором гидравлический импульс создают взаимодействием магнитного поля электромагнитов и импульсного тока, проходящего через жидкость, причем ток пропускают по рабочей жидкости поперек силовых линий импульсного магнитного поля (рис. 4.15). При этом импульсное магнитное поле, действуя на деформируемый лист изделия и одновременно пронизывая объем жидкости в камере штамповки, действует и на ток в проводящей жидкости и вызывает появление в ней мощного импульсного толчка жидкости, направленного в сторону штампуемого изделия. Кроме того, часть тока (или весь ток), протекающего по соленоидам устройства, одновременно проходит и через жидкость. В результате значительно бо́льшая часть энергии магнитного силового поля передается обрабатываемому изделию, а КПД этого метода значительно выше, чем при обычном способе магнитоимпульсной обработки.

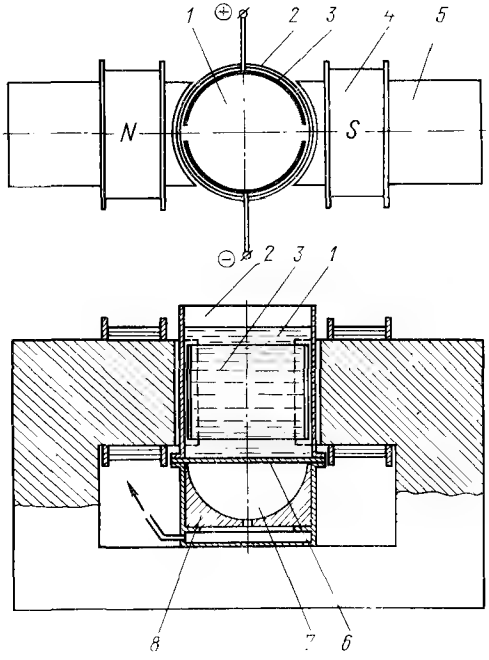


Рис. 4.15. Устройство для магнитогидравлической штамповки:
1 - полость магнитопроницаемого сосуда, заполненная жидкостью; *2* — стенка сосуда, *3* — пластинчатый электрод; *4* - катушка электромагнита; *5* — тело электромагнита; *6* - штампуемый лист; *7* вакуумируемая полость матрицы; *8* матрица

Как известно, все индукторы для магнитоимпульсной обработки отличаются чрезвычайной нестойкостью к действию пондеромоторных сил, в результате чего они разрушаются и быстро выходят из строя.

Разработанный авто́ром тип стойкого, практически не разрушаемого индуктора представляет собой эластичную (например, резиновую) трубку, заполняемую ртутью, амальгамой или обрезками тонкой проволоки, смоченной ртутью [87]. Как бы ни были велики силы, действующие на подобный индуктор, высока́я

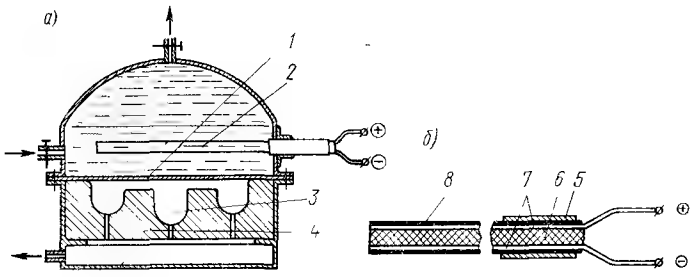


Рис. 4.16. Устройство для штамповки импульсной дугой: *а* — общий вид; *б* — конструкция электродов дуги;
1 — штампуемый лист; *2* — дуговые электроды, *3* — вакуумируемая полость матрицы; *4* — матрица, *5* — обойма; *6* — сгорающий диэлектрик, *7* — стержневые электроды свечи; *8* — изолирующая обтяжка

эластичность его конструкции полностью компенсирует их, сохраняя индуктор целым.

Штамповка импульсной дугой. Особой разновидностью импульсных методов штамповки является метод штамповки импульсной дугой [96]. Известно, что дуга, созданная в объеме жидкости (например, воды), образует большое количество паров и газов, давление которых может быть использовано для деформации (например, штамповки) при условии организации этого процесса в герметизированной камере. Подобный процесс не будет импульсным и по сути дела не будет ничем отличаться от обычного процесса (например, гидравлического) выдавливания. Импульсные же процессы, как известно, отличаются более высокими технологическими показателями и потому более прогрессивны.

Однако электрическая дуга может быть организована и как импульсное явление. Для этого заряженную низковольтную конденсаторную батарею большой емкости разряжают в жидкости на коротком разрядном промежутке (для многократной повторяемости выполняемом аналогично свече Яблочкова), на котором в режимах разряда может существовать только дуга, но при этом разряд батареи осуществляется достаточно быстро, пары и газы образуются практически импульсно. Поэтому и внешне, и по характеру своего воздействия на материалы это явление становится аналогичным взрыву обычных ВВ, применяемых, например, при штамповке металлов взрывом.

Этот процесс является более безопасным, чем с применением ВВ, легкоуправляемым и допускает многократную повторяемость без переналадки устройства (рис. 4.16,*а, б*).

4.4. Электрогидравлические молоты

При ковке, штамповке, чеканке, наклепе, резке и других видах обработки материалов ударные деформирующие усилия могут быть получены посредством электрогидравлических ударов,

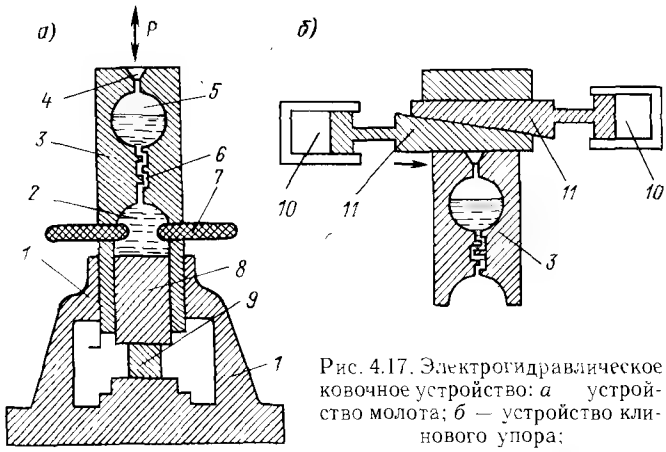


Рис. 4.17. Электрогидравлическое ковочное устройство: *а* — устройство молота; *б* — устройство клинового упора;

1 — станина; *2* — рабочая полость; *3* — цилиндр *4* — воронка, *5* — резервуар; *6* — коленчатый канал; *7* — электроды; *8* — поршень, *9* — обрабатываемое изделие; *10* — гидроцилиндры, *11* — клинья

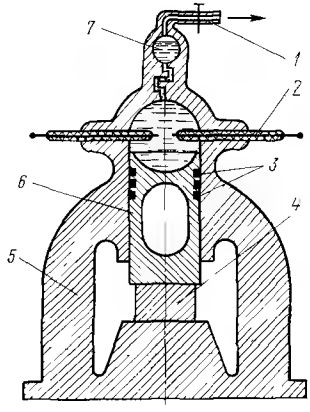


Рис. 4.18. Электрогидравлический молот:

1 — патрубок отвода газов; *2* — электрод; *3* — сальник, *4* — обрабатываемое изделие, *5* — станина, *6* — поршень; *7* — ресивер с тормозным каналом

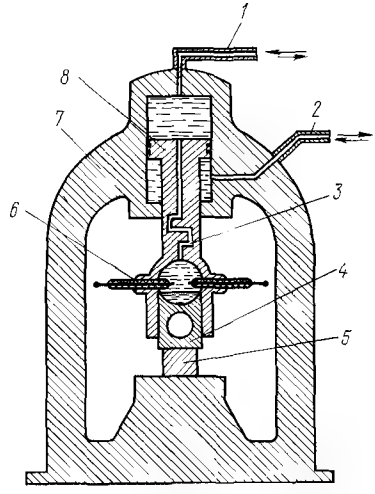


Рис. 4.19. Электрогидравлический вибропресс:

1, *2* — патрубки подачи воды для опускания и подъема поршня гидравлического пресса соответственно, *3* — тормозной канал, *4* — поршень электрогидравлического вибратора, *5* — обрабатываемое изделие; *6* — электрод, *7* — станина; *8* — поршень гидравлического пресса

воспроизводимых в заполненной жидкостью камере, цилиндре с поршнем или мембраной, которые воспринимают усилия ударов и передают их непосредственно или через соответствующий связанный с ними рабочий инструмент деформируемому объекту. При этом обратное перемещение поршня или мембраны осуществляется за счет атмосферного давления при захлопывании кавитационной полости.

Установка, использующая мощное импульсное воздействие электрогидравлических ударов на поршень, размещенный в цилиндре с жидкостью [16], представляет собой электрогидравлический молот или ковочное устройство (рис. 4.17,*а*). Под действием собственного веса цилиндр с поршнем, лежащим на обрабатываемом изделии, свободно перемещаются в направляющих станины молота при электрогидравлических ударах, возникающих на электродах в рабочей полости цилиндра. Опускание цилиндра с поршнем на изделие перед началом обработки и подъем после окончания обработки осуществляются обычными механическими средствами. Масса поршня в такой конструкции электрогидравлического молота должна быть значительно меньше массы цилиндра и связанных с ним деталей, в силу чего гидравлический удар, распределяясь между обеими массами, позволит получить более мощное воздействие поршня на деформируемый материал.

Для устранения реактивных потерь энергии при ударах можно применить устанавливаемое над корпусом электрогидравлического молота приспособление в виде клинового механизма, состоящего из двух плоских клиньев, движение которых управляется гидроцилиндрами, встроенными в станину (рис. 4.17,*б*). По мере деформации изделия клинья автоматически сдвигаются, создавая постоянный упор поршня [16].

В другой конструкции электрогидравлического молота [6] рабочий цилиндр может быть жестко связан со станиной и при ударах перемещаться будет только поршень (рис. 4.18).

Сходное устройство, в котором разряды повторяются достаточно часто и которое вместе с поршнем гидравлически прижимается к изделию (рис. 4.19), может быть названо вибромолотом или вибропрессом [6]. Каждый электрогидравлический удар, возникающий в системе над поршнем, переводит обрабатываемый металл изделия за предел текучести, а сравнительно небольшое внешнее давление на систему легко деформирует далее уже текущий металл. При этом необходимо не только правильно подобрать энергию удара и соответственно внешнее давление, но также и оптимальную частоту следования импульсов.

4.5. Электрогидравлические вибраторы

Конструктивных вариантов электрогидравлических вибраторов в соответствии с их назначением может быть предложено очень много. Но в любых вариантах электрогидравлические вибраторы

в принципе выполняются в виде заполненных проточной жидкостью камер необходимой конфигурации с размещенными в них электродами [31]. Камеры снабжаются одним или несколькими поршнями или мембранами, воспринимающими энергию электрогидравлических ударов и передающими вибрацию на обрабатываемый объект.

Поршневой электрогидравлический вибратор представляет собой цилиндр с одним или двумя рабочими поршнями (рис. 4.20,*а*). Передающий вибрацию элемент, установленный внутри цилиндра, может быть выполнен также в виде мембраны из эластичного материала (рис. 4.20,*б*). Камера электрогидравлического вибратора, выполненная из эластичного материала, может иметь произвольную форму, например резервуара, закрытого крышкой, или эластичного мешка, заполненного рабочей средой (рис. 4.20,*в*). Как и в других электрогидравлических устройствах, для усиления действия вибрации разрядники снабжаются отражающими поверхностями.

Электрогидравлические вибраторы обладают особенностями, позволяющими весьма эффективно использовать их в ряде конкретных случаев. Так, электрогидравлические вибраторы создают механический импульс очень большой мощности, имеющий чрезвычайно крутой передний фронт и относительно пологий задний, что делает их использование особенно перспективным, в частности для вибротранспортеров. Амплитуда рабочего перемещения поршня или мембраны электрогидравлического вибратора может при желании достигать 10 см и более. Возврат поршня в исходное положение совершается автоматически (при захлопывании кави-

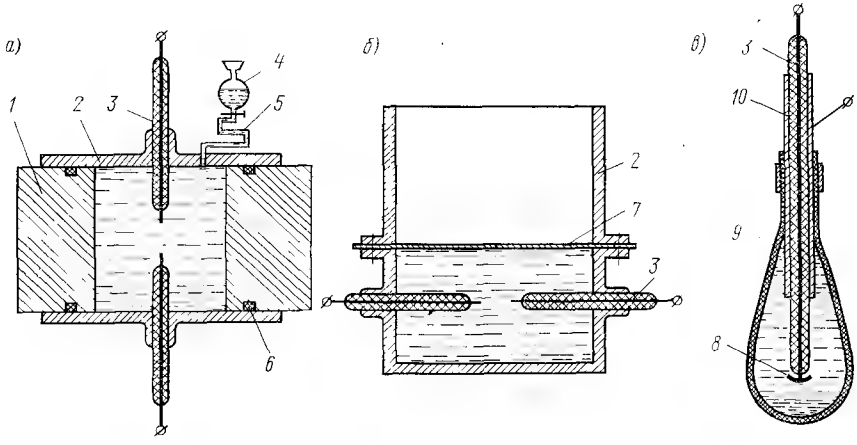


Рис. 4.20. Электрогидравлические вибраторы: *а* — с двумя поршнями; *б* — с мембраной; *в* — в виде эластичного мешка;
1 — поршень; *2* — камера вибратора; *3* — электрод; *4* — резервуар; *5* — лабиринтный канал; *6* — сальниковое уплотнение; *7* — мембрана; *8* — тарельчатый конец электрода; *9* — эластичный мешок; *10* — металлическая труба (второй электрод)

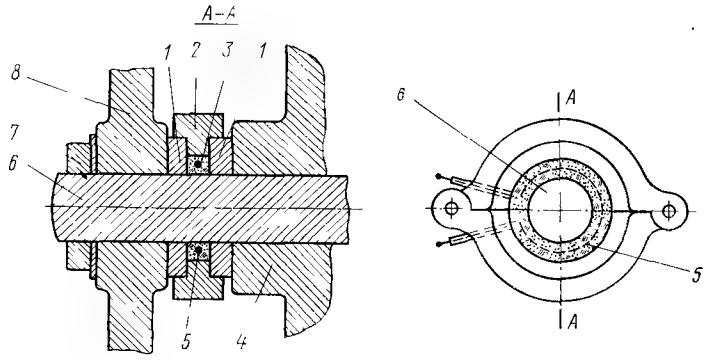


Рис. 4.21. Электрогидравлическое устройство для снятия или посадки винта на вал:
1 — разъемное упорное кольцо, *2* — разъемная обойма, *3* — заполнитель из геля, песка и т. д., *4* — выступ корпуса; *5* — проволочный ВТЭ; *6* — вал винта; *7* — крепление винта, *8* — винт

тационной полости) за счет атмосферного давления. Получение от электрогидравлического вибратора механического импульса с усилием в несколько сотен тонн не представляет особых трудностей.

Простота конструкции, малый износ и огромная сила удара электрогидравлических вибраторов позволяют им найти самое широкое применение в различных областях техники: для уплотнения грунта, бетона, силоса, рыхления, забивки свай и шпунта, вибромельниц, дробилок, обогащения руд, ковочно-чеканных работ по металлу, повышения эффективности прокатки и т. п. [6]. Особый интерес представляет применение электрогидравлических вибраторов в порошковой металлургии.

С помощью устройства, аналогичного одному из вариантов электрогидравлического вибратора, могут выполняться и такие трудоемкие операции, как снятие или посадка на вал или ось крупных деталей машин (например, гребных винтов), осуществление которых в обычных условиях крайне сложно [80]. Тем более трудно будет осуществить подобные операции на плаву в открытом море.

С помощью электрогидравлического устройства, приведенного на рис. 4.21, эта операция может быть значительно упрощена путем использования в устройстве высоких давлений, возникающих при тепловом взрыве ВТЭ. Электрогидравлическое разборное устройство по частям вводится в зазор между ступицей и винтом, после чего тепловой взрыв ВТЭ, осуществляемый в замкнутой между упорными охватывающими кольцами камере, легко и безопасно сдвигает винт с вала. В качестве наполнителя в камере могут быть применены вода, сухой и увлажненный песок, гипс, гель. Таким же устройством, но устанавливаемым уже с другой стороны винта, может осуществляться и посадка винта на вал.

4.6. Электрогидравлические насосы

При выполнении операций штамповки и других видов обработки может быть предложен метод обработки непрерывной или пульсирующей струей жидкости высокого и сверхвысокого давлений, полученной от электрогидравлического насоса [21]. Изменение характера воздействия и регулирование его режима достигаются изменениями давления, формы струи, состава жидкости, а также угла падения струи на обрабатываемую поверхность. Истечение струи под высоким и сверхвысоким давлениями получают из узкого отверстия электрогидравлического насоса.

Предложено несколько вариантов электрогидравлических насосов, которые могут быть использованы при резке, шлифовании, полировании материалов тонкой струей жидкости, додавливании изделий, штампуемых на гидропрессах, штамповке изделий на гидропрессах с резиновым пуансоном, штамповке утяжеленной струей жидкости, электрогидравлической очистке изделий, подаче топлива в реактивных двигателях, а также в химических аппаратах высоких давлений [6, 7, 15, 17, 21, 28, 35, 58].

Принцип работы любого электрогидравлического насоса основан на действии электрогидравлического удара в жидкости, при котором образуется кавитационная полость и жидкость с огромной скоростью выбрасывается через сопло под действием сверхвысоких давлений, верхний предел которых ограничен только мощностью силовой электрогидравлической установки и прочностью камеры насоса и ресивера. Электрогидравлические насосы любой конструкции отличаются простотой и компактностью, отсутствием движущихся частей, легкостью управления и регулирования, большим диапазоном действия.

Одноступенчатые электрогидравлические насосы. В одноступенчатом электрогидравлическом насосе обратный ток жидкости из камеры ресивера в камеру нагнетания устраняется с помощью малоинерционных клапанов [28]. Подводящий канал, соединяющий камеру нагнетания с питающим трубопроводом, для устранения потерь давления выбрасыванием жидкости из камеры нагнетания при электрогидравлических ударах может иметь несколько поворотов под прямым углом. Тем самым он полностью заменяет собой клапан (рис. 4.22). Для получения постоянной по скорости и давлению струи жидкости, выходящей под давлением из работающего электрогидравлического насоса, может быть применен также располагаемый в ресивере и заключенный в резиновый мешок воздушный пузырь – демпфер, устраняющий пульсирующие толчки ударного поступления жидкости.

Повысить КПД электрогидравлического насоса можно за счет использования кумулятивного эффекта. Для усиления движения жидкости в направлении к ресиверу стенка камеры нагнетания, лежащая против клапана, выполняется полусферической. Повысить эффективность работы можно также, если расположить

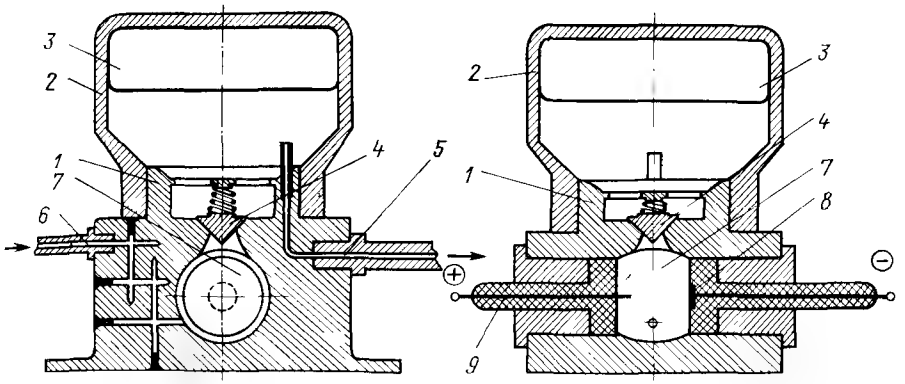


Рис. 4 22. Электрогидравлический насос с нагнетательной камерой:
1 корпус насоса; *2* ресивер, *3* воздушная подушка демпфера; *4* обратный клапан, *5* отвод жидкости; *6* подвод жидкости; *7* — нагнетательная камера; *8* пластина отрицательного электрода; *9* — положительный электрод

нагнетательную камеру в полости ресивера и ограничить ее нагнетательным клапаном, выполненным в виде двух подпружиненных колец, установленных на основаниях камеры с возможностью их перемещения [35]. При этом в ресивер передаются давления как за счет выброса жидкости из нагнетательной камеры, так и за счет перемещения подпружиненных колец нагнетательного клапана.

Для обеспечения необходимой синхронизации закрытия нагнетательного клапана после электрогидравлического удара внутри камеры насоса хвостовик клапана, отделяющий основную камеру от дополнительного цилиндра, жестко соединен со штоком поршня этого цилиндра с вмонтированными в него электродами. В таком электрогидравлическом насосе с управляемым клапаном (рис. 4.23) при возникновении электрогидравлического удара в основной камере жидкость через открывшийся управляемый клапан начинает поступать в ресивер. Затем в установленное время через схему зажигания срабатывает вспомогательный разрядник и возникает электрогидравлический удар в дополнительном цилиндре, заполненном жидкостью, в результате клапан закрывается [58]. Тот же эффект может быть достигнут и при отсутствии в дополнительном цилиндре насоса электродов и системы поджига с блоком задержки поджига. Необходимая синхронизация запаздывания закрытия нагнетательного клапана после электрогидравлического удара внутри основной камеры достигается тем, что основная камера соединяется с камерой дополнительного цилиндра трубкой такой длины, чтобы время прохождения по ней волны сжатия жидкости соответствовало необходимому времени запаздывания закрытия нагнетательного клапана.

Электрогидравлическая форсунка. Принцип, положенный в основу действия электрогидравлических насосов, используется и в

электрогидравлической форсунке для распыления жидкостей [18]. Электрогидравлическая форсунка (рис. 4.24) представляет собой устройство для подачи, распыления и засасывания новой порции жидкости (например, топливной). Это устройство включает в себя камеру, образуемую полостью, с одной стороны закрытой подвижным поршнем. В корпус камеры вмонтированы электроды, камера снабжена удлиненным соплом для выброса жидкости. Головка поршня имеет сферическую форму с фокусом в месте выхода жидкости. На входе в камеру, в форсунке, имеется спиральный или изогнутый в виде колен канал, через который в камеру подается жидкость. Канал предназначен для гашения ударного импульса, идущего в направлении питающего резервуара. Через аналогично выполненный канал жидкость непрерывно вытекает из камеры. При электрогидравлическом ударе происходит основной выброс жидкости через сопло, а часть жидкости поступает в камеры запаздывания, что позволяет получать дополнительные последовательные выбросы жидкости. Со стороны, противоположной соплу, камера закрыта подвижным поршнем, рабочая поверхность которого покрыта слоем изоляционного материала и является кумулятивным отражателем, предназначенным для уменьшения потерь и ориентации струи в направлении сопла. Автоматическое перемещение поршня позволяет изменять объем камеры и, следовательно, давление, при котором происходит выброс жидкости. Для обеспечения синхронности подачи жидкости с работой других механизмов (например, двигателей) применяют обычные замыкающие устройства типа трамблера или электронные

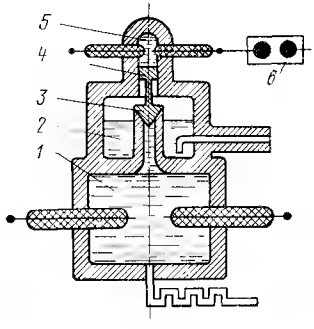


Рис. 4.23. Электрогидравлический насос с управляемым клапаном:
1 — основная камера; *2* — ресивер; *3* — клапан соединительной трубки; *4* — шток поршня; *5* — дополнительный цилиндр; *6* — разрядник, связанный со схемой зажигания, включающей блок запаздывания

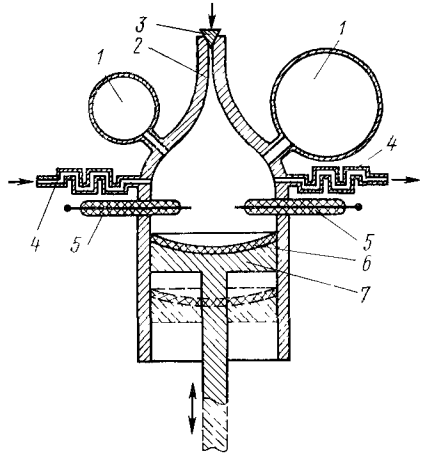


Рис. 4.24. Электрогидравлическая форсунка:
1 — камеры запаздывания; *2* — сопло; *3* — клапан сопла; *4* — каналы подачи и вывода жидкости; *5* — электроды; *6* — сферическая поверхность поршня; *7* — поршень

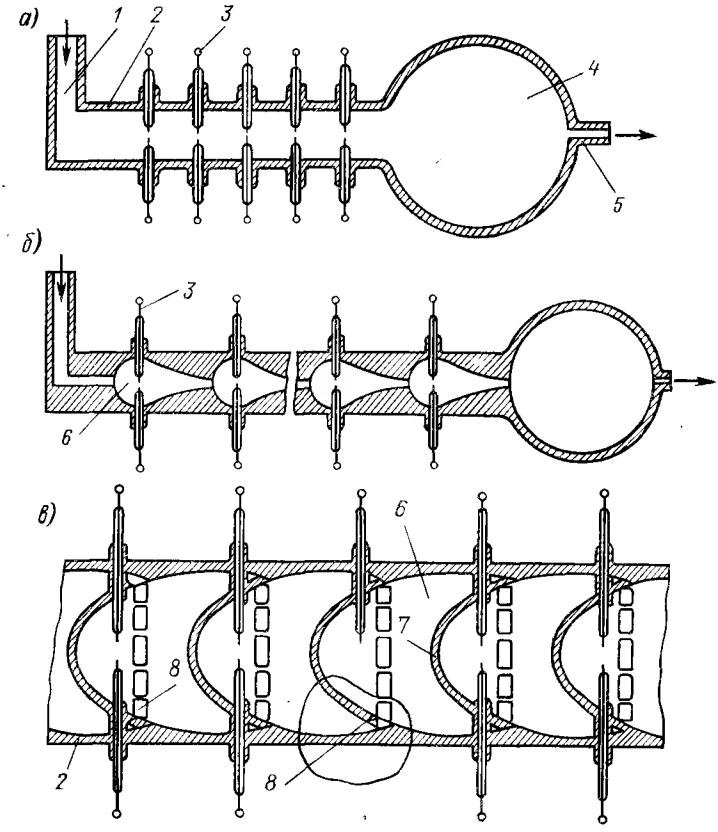


Рис. 4.25. Многоступенчатые электрогидравлические насосы: *а* — с общей камерой; *б* — с отсеками, разделенными обратными клапанами; *в* — с отсеками, разделенными перегородками; *1* — трубопровод; *2* — гидравлическая камера; *3* — электроды; *4* — ресивер; *5* — трубопровод высокого давления; *6* — параболический отсек; *7* — дырчатые перегородки; *8* — отверстия в перегородках

блоки запаздывания, синхронно связанные с данным механизмом.

Опытами установлено, что подача топлива и распыление его применительно к двигателям внутреннего сгорания наиболее рациональны при $l = 1{,}0 : 1{,}5$ см, $C \leqslant 1{,}0$ мкФ и $U = 20 : 30$ кВ.

Многоступенчатые электрогидравлические насосы. Электрогидравлический насос может представлять собой цилиндрическую гидравлическую камеру, разделенную на отсеки (или без них), сообщающуюся одним концом с трубопроводом, по которому подается жидкость, а другим — с ресивером. При этом рабочие искровые промежутки располагаются на определенном расстоянии друг от друга в общей камере (рис. 4.25,*а*) или в каждом из отсеков (параболической формы) камеры, между которыми устанавливаются обратные клапаны (рис. 4.25,*б*) или перегородки

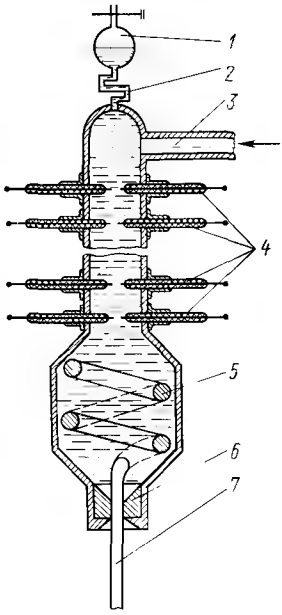


Рис. 4.26. Устройство для электрогидравлической обработки методом экструзии:
1 — ресивер с патрубком отвода газов; *2* — тормозной канал, *3* — патрубок подачи воды; *4* — электроды, *5* — заготовка изделия в ресивере штамповки; *6* — фильера; *7* — готовое изделие

с мелкими отверстиями (рис. 4.25, *в*). Для осуществления заданного чередования разрядов на рабочих искровых промежутках применяют тумблерное или поджигающее устройство. Придание последовательно расположенным отсекам формы входящих одна в другую парабол (в сечении) и установка обратных клапанов или перегородок с мелкими отверстиями между отсеками способствуют сообщению направления ударной волне и перемещению последовательно сжимаемой в отсеках жидкости в сторону ресивера. Многоступенчатый электрогидравлический насос является по сути оригинальным гидравлическим «линейным ускорителем» жидкости, а будучи выполненным в виде замкнутого кольца, явится своеобразным гидравлическим «циклотроном» [15].

Многоступенчатый электрогидравлический насос можно применять и для обработки материалов методом экструзии [17]. В этом случае последовательное нарастание деформирующих усилий создается в результате действия многоступенчатого электрогидравлического насоса, скомпонованного с прессом в единый агрегат (рис. 4.26). В камеру насоса подается жидкость под некоторым первоначальным давлением, недостаточным для начала постоянного течения материала (например, металла), но вполне достаточным для поддержания этого течения после перехода через предел текучести. Деформирующие усилия создаются при помощи электрогидравлических ударов, воспроизводимых на разрядниках последовательным чередованием искровых разрядов. В результате жидкость под высоким давлением непрерывно поступает в рабочую камеру пресса, где расположен запас обрабатываемого материала и фильера, через которую осуществляется выдавливание материала до заданного профиля. При этом стенки насоса и ресивера рабочей камеры должны иметь значительную прочность, обусловленную сверхвысокими давлениями. Экструзионное выдавливание материала может осуществляться только за счет постоянного действия электрогидравлического насоса.

Представляет интерес и метод обработки струей, полученной от электрогидравлического насоса, в том числе и порционной струей утяжеленной жидкости [85]. При обработке материалов струей жидкости высокого и сверхвысокого давлений, получаемой

от электрогидравлического насоса, повышение эффективности обработки может быть достигнуто увеличением плотности жидкости (до 5 г/см^3 и более) при введении в нее утяжеляющих примесей, как растворимых в жидкости, так и не растворимых, и разбивкой струи на порции.

Однако утяжеляющие примеси вызывают загустение жидкости до пластичного, глиноподобного состояния и могут сделать практически невозможной работу насосов даже сравнительно низкого давления. Но введение дозированных количеств сжатого воздуха в канал, недалеко от выхода наружу утяжеленной жидкости, вызовет разделение струи на определенные порции. Расширение дозированного объема сжатого воздуха сообщит каждой порции заданную скорость. В итоге на выходе такого устройства возникнет порционная струя, состоящая из единичных тяжелых масс, двигающихся с очень большими скоростями.

Такая порционная струя может быть направлена на закрепленный на матрице металлический лист, что обеспечит штампование этого листа или выдавливание как вогнутых, так и выпуклых изделий. Изменяя наклон струи относительно плоскости обрабатываемой поверхности, можно регулировать величину воздействия на нее и осуществлять очистку, полирование или шлифование изделий. Введение в состав жидкости каких-либо абразивных добавок сообщит ей абразивные свойства.

Подобной порционной струей может быть осуществлено разрушение (например, горных пород), а также резание металлов. Утяжеленная порционная струя достаточно большого давления оказывается способной резать, например, движущийся прокат [21, 30, 39]. Электрогидравлическое резание различных материалов [30] может осуществляться и посредством перемещения электродов разрядника, между которыми в жидкой среде происходят разряды в непосредственной близости от поверхности разрезаемого материала. При этом электроды укрепляют на изоляционной колодке, через которую проходит канал для подачи жидкости, а поверхность колодки между электродами снабжается отражающим или фокусирующим устройством для получения направленного действия электрогидравлических ударов. Воздействием электрогидравлического удара снизу на непрерывно движущийся

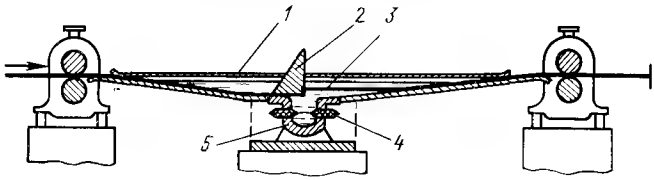


Рис. 4.27. Электрогидравлическое устройство для разрезания непрерывно движущегося проката:
1 ванна, через которую проходит прокат, *2* упор нож; *3* - прокат; *4* электроды; *5* разрядная камера

над разрядом лист проката можно осуществить резку движущегося проката на мерные листы [39].

Устройство для разрезания непрерывно движущегося проката выполняется в виде ванны с водой – для холодного или с расплавом соли – для горячего металла (рис. 4.27). В средней части ванны располагается массивный упор-нож, а в нижней ее части против упора-ножа размещается разрядная камера с электродами. Расположение упоров-ножей и разрядных камер может быть верхним, нижним или боковым в зависимости от технологической схемы. Для получения мерной длины отрезка проката разрядный импульс дается через фотоэлемент, установленный на заданном расстоянии от места разреза.

4.7. Электрогидравлическая раздача, развальцовка, обжатие

Использование электрогидравлического эффекта для раздачи, развальцовки, обжатия различных изделий представляется весьма перспективным. Так, широкое промышленное внедрение электрогидравлической развальцовки трубок позволяет устранить тяжелую и малопроизводительную ручную операцию раздачи и запрессовки трубок в трубных досках теплообменных аппаратов, механизировать, ускорить и удешевить этот процесс. Электрогидравлическая раздача позволяет также эффективно восстанавливать размеры изношенных и бракованных полых изделий [6, 19, 23, 24]. В настоящее время электрогидравлические установки моделей «Молния-3», «Молния-5М», «Молния-6у», «Молния-8», «Молния-9» и другие для закрепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов различного назначения выпускаются серийно. Еще в начале 1950-х годов впервые было разработано несколько вариантов осуществления основного способа электрогидравлической раздачи изделий (например, развальцовки) как с применением теплового взрыва ВТЭ [23], так и искрового разряда [34].

Электрогидравлическая развальцовка может осуществляться несколькими способами: прямым действием электрогидравлического удара, возникающего на устройстве, размещенном в раздаваемой трубке, заполненной жидкостью; электрогидравлическим ударом, действующим через эластичную стенку специального, заполненного жидкостью патрона, помещаемого в раздаваемую трубку (рис. 4.28); электрогидравлическим ударом, возникающим в жестком металлическом устройстве (рис. 4.29), усилия которого передаются через окна корпуса устройства и действуют на заданный участок стенки раздаваемой трубки и т. п. [6].

Во всех указанных вариантах развальцовки могут использоваться и искровой разряд, и тепловой взрыв. При тепловом взрыве ВТЭ размещают и в жидкости, и в пластмассе, и в самотвердеющем материале, а устройства для развальцовки выполняют как для одноразового, так и для многоразового действия

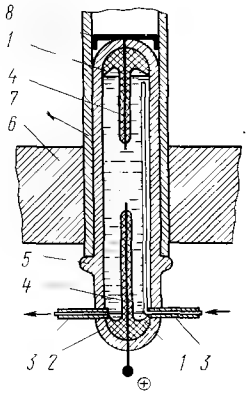


Рис. 4.28. Устройство для электрогидравлической развальцовки трубок эластичным патроном:
1 отражатель, *2* — эластичный патрон (оболочка); *3* трубки подачи и отвода воды; *4* — электроды; *5* — выступ упора (фиксатор); *6* — трубная доска; *7* вальцуемая трубка, *8* — место контакта отрицательного электрода с телом трубки

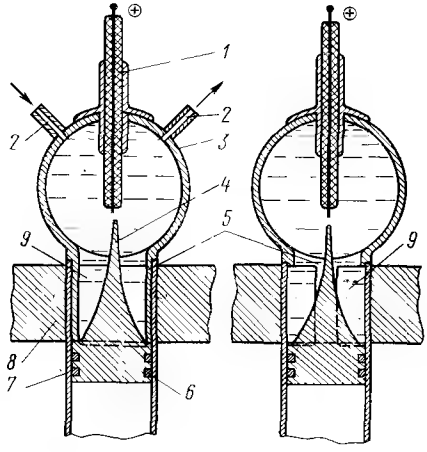


Рис. 4.29. Устройство для электрогидравлической развальцовки трубок жестким патроном:
1 положительный электрод; *2* — патрубки для подвода и отвода воды; *3* — корпус устройства, *4* — отрицательный электрод (выступ корпуса); *5* соединительная перемычка корпуса; *6* — сальники; *7* вальцуемая трубка; *8* — трубная доска; *9* — окна корпуса

(в том числе используют и способ непрерывной подачи на разряд проволочного ВТЭ и размещение ВТЭ в жестком или эластичном патроне).

В одном из вариантов устройство выполнено из пластмассового стержня, по оси которого размещен ВТЭ. К переднему концу ВТЭ, выступающему из пластмассы, подается импульс. Задний конец ВТЭ отогнут и контактирует со стенкой вальцуемой трубки (рис. 4.30). Токопровод к ВТЭ и токопровод от него, контактирующий с вальцуемой трубкой, выполняют из толстого проводника, в силу чего взрывается только локально расположенный участок ВТЭ, выполненный из тонкой проволоки. Этим достигается точная фиксация вальцующего усилия в строго заданном месте трубки [6].

В другом варианте подводящие контакты ВТЭ от большой группы вальцующих устройств соединяют с питающей силовой установкой через коммутирующее устройство, задающее последовательные подачу импульсов и срабатывание вальцующих устройств-патронов, а следовательно, и одновременную развальцовку и запрессовку большой группы (до нескольких десятков штук) вальцуемых трубок в трубных досках теплообменных аппаратов.

За счет электрогидравлической развальцовки трубчатой части анкера могут быть осуществлены закрепление анкерной крепи

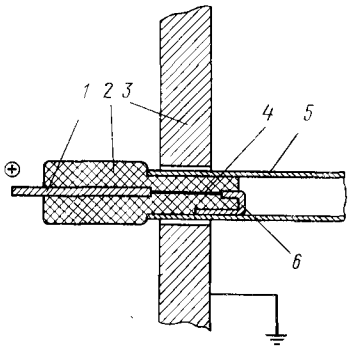


Рис. 4.30. Устройство для электрогидравлической развальцовки трубок тепловым взрывом пластикового патрона:
1 — токопровод; *2* — пластик; *3* — трубная доска; *4* — проволочный ВТЭ; *5* — вальцуемая трубка; *6* — токопровод к контакту с трубкой

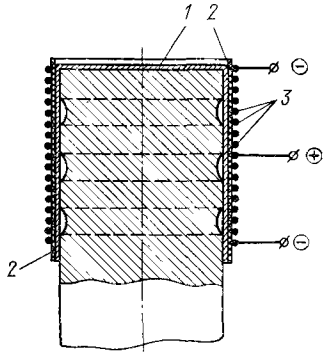


Рис. 4.31. Устройство для обжатия изделий тепловым взрывом:
1 — обжимаемое изделие, *2* — диэлектрическая прокладка; *3* — витки проволочного ВТЭ

в скважинах шахт и многие другие трудоемкие операции. При осуществлении всех вариантов электрогидравлической раздачи и развальцовки для повышения степени энергопередачи могут также использоваться утяжеление рабочей жидкости [85] и замена жидкости сыпучим или пластичным материалом, в том числе и самотвердеющим [66].

Кроме развальцовки или раздачи изделий, электрогидравлическая обработка применима и для обжатия изделий [76]. Для этого искровые разряды или тепловые взрывы организуют по внешней поверхности обжимаемого изделия (рис. 4.31).

При этом поверхность изделия в месте обжатия покрывают тонким слоем какого-либо диэлектрика (например, лака, слюды, асбеста или бумаги), с тем чтобы избежать прямого контакта накладываемой на эту поверхность спирали ВТЭ с поверхностью изделия. Спиральный ВТЭ накладывают или наматывают на обжимаемый участок изделия, обеспечивая заданное значение обжимающего усилия на этом участке, а параметры ВТЭ и подаваемого на него импульса выбираются такими, чтобы осуществить всю операцию обжатия за один прием [71], например, с помощью спиральных ВТЭ, размещенных на втулках изношенных и потерявших размер окон поршневых пальцев, последние могут быть эффективно обжаты за один прием. Для всестороннего объемного обжатия особо прочных изделий может быть применен ВТЭ, выполненный в виде двух полых конусов, сопряженных основаниями.

Электрогидравлическая раздача изделий действием искрового разряда или теплового взрыва ВТЭ (например, для восстановления размеров изношенных или бракованных полых изделий)

может осуществляться внутри толстостенной металлической формы, имеющей внутренние размеры, соответствующие заданным размерам изделия. Раздаваемое полое изделие (например, поршень) устанавливается в эту форму, полость поршня и формы заполняется жидкостью и форма закрывается крышкой, через которую в изолирующей оболочке пропущен электрод. Для локализации разряда между электродом и раздаваемым изделием на дно поршня устанавливается металлический стержень.

В устройстве для электрогидравлической раздачи изделий может применяться и эластичный патрон, например, раздаваемый поршневой палец или траковая втулка устанавливается в толстостенную форму-обойму (рис. 4.32, *а*), а в полость поршневого пальца вставляется заполненная жидкостью трубчатая эластичная оболочка-патрон с электродами [34]. Тот же эффект может быть достигнут и воспроизведением в полости раздаваемого изделия теплового взрыва ВТЭ в каком-либо сыпучем материале, например в песке (рис. 4.32, *б*). Указанными способами изношенные детали могут быть расширены до заданного предела, определяемого размерами прочной матрицы, а затем обработаны и возвращены в эксплуатацию. Электрогидравлической обработкой могут быть устранены и всякого рода помятости на кузовах вагонеток или автомашин, в емкостной металлической таре (флягах, бочках, бидонах). Для этого, например, деформированный бидон устанавливают в разъемную железобетонную матрицу, заполненную водой, и осуществляют в ней электрогидравлические удары (рис. 4.33). Операции восстанов-

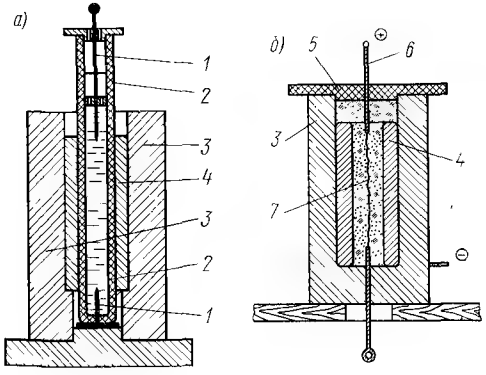


Рис. 4.32. Электрогидравлические устройства для восстановления размеров: *а* — полых деталей машин с применением эластичной оболочки; *б* — изношенных поршневых пальцев, втулок;
1 — электроды; *2* — эластичная оболочка, заполненная жидкостью; *3* — толстостенная «обойма»; *4* — восстанавливаемая деталь, *5* — крышка из диэлектрика; *6* — токопровод к ВТЭ, *7* — проволочный ВТЭ

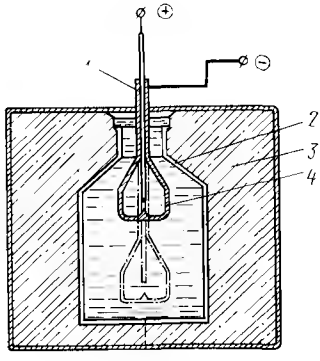


Рис. 4.33. Электрогидравлическое устройство для восстановления формы помятой тары:
1 — положительный электрод, *2* — корпус изделия, *3* — железобетонная матрица; *4* — отрицательный электрод

ления размеров могут быть подвергнуты многие виды изделий (в том числе и такие громоздкие, как полые судовые валы).

При изготовлении многослойных газовых баллонов или химических реакторов высокого давления, подвергаемых автофреттажу, все операции автофреттажа, осуществляемые обычно с помощью сложной и дорогостоящей аппаратуры, могут быть заменены электрогидравлической обработкой.

4.8. Электрогидравлическое упрочнение и наклеп

Посредством искрового разряда или теплового взрыва может быть осуществлено и поверхностное упрочнение металла изделий или их наклеп [6, 7, 71, 76]. В том случае, если не требуется высокого качества обработки поверхности изделия, его используют как второй электрод. Однако, когда следы отдельных электрогидравлических ударов перекрывают друг друга, то обеспечивается сплошность наклепа и сохранение гладкой поверхности изделия. Применение больших мощностей позволяет получать значительную глубину наклепанного слоя.

Упрочнению или наклепу могут быть подвергнуты как плоские, так и сферические поверхности. Особенно перспективен электрогидравлический наклеп поверхности внутренних полостей различных изделий, который иными способами осуществить крайне сложно. Для устранения односторонних усилий, действующих на изделие, могут быть применены два противоположно расположенных и последовательно соединенных рабочих промежутка, пробиваемых практически одновременно. Каждый искровой промежуток располагают внутри сферической кумулятивной выемки, стенка которой находится от зоны разряда на расстоянии, большем радиуса зоны разрушения. Подобному наклепу могут подвергаться, в частности, оси, валы, цапфы, внутренние и внешние поверхности, обоймы и шарики подшипников, полости цилиндров двигателей, направляющие станин и т. д.

Если поверхность изделия уже обработана с высокой точностью и повреждение его поверхности «ожогами» от наклепа совершенно недопустимо, упрочнение (наклеп) поверхности осуществляют методом теплового взрыва, размещая проволочный, ленточный или другой ВТЭ непосредственно вблизи упрочняемой поверхности, отделяя ее от ВТЭ тонким слоем какого-либо диэлектрика [71].

Для упрочнения плоских поверхностей обрабатываемых материалов ВТЭ выполняют в виде плоской спирали (рис. 4.34), охватывающей всю площадь, подлежащую упрочнению. При упрочнении круглых (цилиндрических) поверхностей ВТЭ выполняют в виде цилиндрической спирали. Если упрочняемая поверхность имеет большую длину и не охватывается воздействием одного ВТЭ, ее покрывают несколькими ВТЭ, срабатывающими последовательно (например, по принципу «бегущей волны»).

Как уже указывалось, действие ВТЭ может быть не только односторонним, но и объемным. Так, при тепловом взрыве ВТЭ, выполненного в виде трубки, конуса или другого объемного элемента, представляется возможным достаточно просто осуществлять объемное упрочнение стандартных длинных изделий (например, проката, проволоки) с получением в результате такой обработки сверхпрочных изделий. Так, упрочнение проволоки по этому методу осуществляется (рис. 4.35) путем последовательного обжатия непрерывно перемещаемой проволоки через постоянно возобновляемый после каждого теплового взрыва объемный ВТЭ. При этом скорость перемещения проволоки и длина взрываемых ВТЭ подбираются таким образом, чтобы следы воздействия отдельных электрогидравлических ударов на проволоку перекрывали друг друга [6].

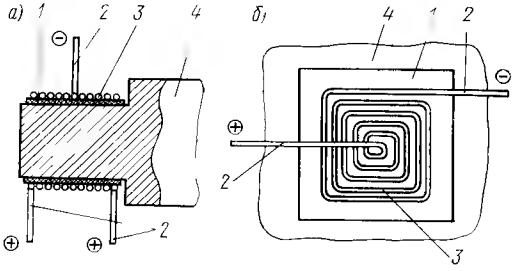


Рис. 4.34 Электрогидравлическое устройство для упрочнения поверхностей тепловым взрывом: *а* – цилиндрической поверхности; *б* — плоской поверхности;
1 — диэлектрическая прокладка; *2* — токопроводы к ВТЭ; *3* — проволочный ВТЭ; *4* — упрочняемое изделие

Для поверхностного упрочнения металлов и других материалов используют также тепловой взрыв ВТЭ, выполненный в виде двух конусов, соединенных своими основаниями или разделенных небольшой цилиндрической вставкой. Этот вариант может применяться для получения алмазов, сверхпрочных материалов, новых видов веществ.

Если электрогидравлической обработке действием искрового разряда или теплового взрыва подвергать изделия, нагретые до высокой температуры (в том числе и до температуры структурного перехода металлов из одного состояния в другое), то такой термомеханической обработкой могут быть достигнуты или усилены ценные технологические свойства обрабатываемых изделий. При этом, изменяя температуру и режимы обработки, можно получать как рост, так и измельчение кристаллов, выпадение примесей в меж-

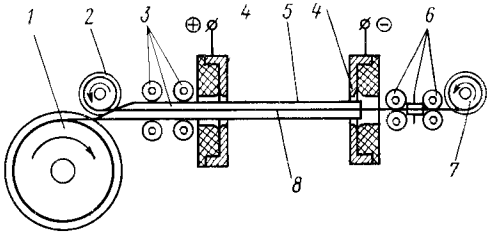


Рис. 4.35. Электрогидравлическое устройство для упрочнения проволоки:
1 — катушка с запасом ленточного ВТЭ; *2* — катушка с упрочняемой проволокой; *3* — ролики подачи ВТЭ; *4* — контакты токопроводов с ВТЭ; *5* — трубчатый ВТЭ; *6* — ролики подачи проволоки; *7* — барабан с готовой продукцией; *8* — упрочненная проволока

кристаллические пространства, дробление дислокаций и другие.

Иногда электрогидравлическую обработку осуществляют, например, в обычной ванне, заполненной водой, маслом, или какой-либо другой жидкостью, куда быстро вносятся предварительно нагретые до заданной температуры изделия, которые в процессе остывания подвергаются электрогидравлической обработке действием быстро чередующихся разрядов.

Представляет интерес возможность электрогидравлической обработки методом теплового взрыва сильно нагретых изделий, помещаемых в расплавы каких-либо солей. В этом случае ВТЭ выполняется из достаточно тугоплавких металлов или, например, в керамической изоляции. При этом возможна не только местная, локальная, деформация изделия, но и любое, в том числе и объемное, сжатие как всего изделия в целом, так и отдельных частей его с мощным воздействием на структуру металла изделия. Перспективной является и электрогидравлическая обработка расплавов различных металлов путем размещения в них изолированных (например, керамикой) ВТЭ. При этом можно осуществить ряд операций обработки (выделение газов, удаление примесей, всплывающих или тонко диспергирующихся при электрогидравлических ударах, и даже операций легирования при распылении в жидком металле специально подобранного металла ВТЭ). Этот путь может быть использован и для получения металлокерамических смесей-сплавов, или смесей-сплавов из несмешивающихся между собой металлов. В последнем случае получение жидкой смеси различных металлов, взятых в определенных пропорциях, или смеси металлов и неметаллов возможно не только тепловым взрывом размещенных в них ВТЭ, но и применением как погруженных в расплав, так и расположенных вне ванны с расплавом электрогидравлических вибраторов обычного типа [31].

Таким образом, удаление газов, шлаков и примесей, перемешивание, тонкое диспергирование примесей, получение эмульсий расплавов металлов друг в друге, а равно и деэмульгирование их — вот далеко не полный перечень возможностей электрогидравлической обработки расплавов.

Усиливает эффективность операций наклепа и поверхностного упрочнения также и применение метода обработки струей утяжеленной жидкости [21, 85], возникающей в результате работы одной из конструкций электрогидравлического насоса сверхвысокого давления. При этом на пути стабильной или пульсирующей импульсной струи жидкости можно размещать изделие любой формы, упрочняя его поверхность как снаружи, так и внутри.

4.9. Электрогидравлическая сварка, спекание, покрытия

Сварка давлением, получившая за последние годы значительное распространение, может выполняться и методами электрогидравлики с помощью усилий, создаваемых искровым разрядом

или тепловым взрывом ВТЭ [6]. Соединение металлов и неметаллов сваркой давлением осуществляется: пуансоном-поршнем, приводимым в движение искровым разрядом; тепловым взрывом объемного ВТЭ, обжимающего соединяемые изделия или детали; при сварке листов тепловым взрывом ряда плоских ВТЭ или ВТЭ, фокусирующих усилия взрыва и размещенных над соединяемыми листами (так, чтобы последовательные взрывы их образовывали «бегущую волну», см. рис. 4.12). Такая сложная сварка может осуществляться только в среде нейтрального газа или в вакууме. Однако точечную сварку можно выполнять и в жидкой среде.

Если электрогидравлический искровой разряд пропустить через объем, заполненный металлическими опилками, то пондеромоторные силы вызовут их уплотнение, а тепловое воздействие тока — спекание отдельных частиц опилок между собой. В результате представляется возможным брикетирование металлических опилок, стружек и других отходов. При поджатии образующегося брикета обычным или электрогидравлическим прессом из металлических опилок, стружек и других отходов могут быть получены плотные монолитные бруски, пригодные как для переплавки, происходящей практически без потерь на угар, так и для обработки штамповкой и резанием с целью получения готовых изделий.

Практический интерес представляет электропневматическое покрытие металлом или неметаллом различных металлических, а также и неметаллических поверхностей изделий. Такое покрытие осуществляется тепловым взрывом в газовой среде [20] с помощью специально подобранного ВТЭ, размещенного над покрываемой металлом (или неметаллом) поверхностью. При этом если поверхность цилиндрическая, то ВТЭ должен быть выполнен цилиндрическим с толстыми (невзрывающимися) токоподводами к обоим его концам или в виде плоской, изогнутой по цилиндру спирали. Если покрываемая поверхность плоская, то ВТЭ пред-

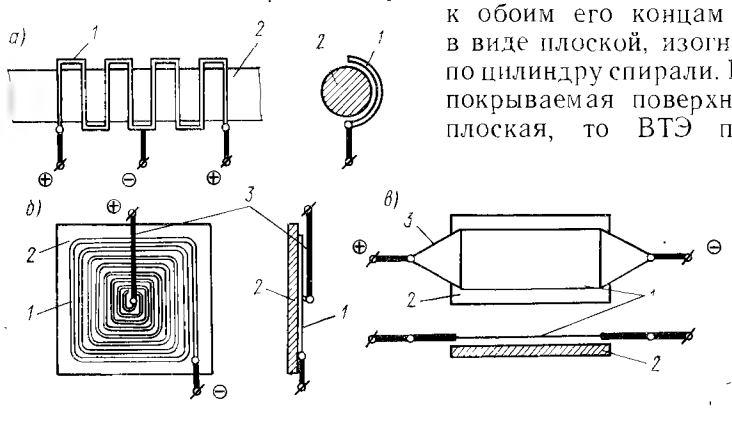


Рис. 4.36. Схемы различных вариантов покрытия с помощью теплового взрыва ВТЭ: *а* — проволочный ВТЭ для обработки цилиндрического изделия; *б* — проволочный ВТЭ для обработки плоскости; *в* — пластинчатый ВТЭ для обработки плоскости; *1* — ВТЭ, *2* — обрабатываемое изделие, *3* — токоподвод

ставляет собой либо плоскую спираль, либо плоскую пластинку из фольги с толстыми треугольными токоподводами к обеим ее концам (рис. 4.36, *а—в*). Параметры импульса для осуществления теплового взрыва ВТЭ подбираются здесь таким образом, чтобы весь ВТЭ полностью обратился в пар, иначе жидкие капли от не полностью испарившегося ВТЭ не смогут достаточно прочно внедриться в поверхность материала. При выполнении этого условия покрытие получается очень прочным, совершенно не отделимым от поверхности керамики, пластмассы или другого материала [6].

В случае осуществления покрытия не металлом, а каким-либо другим материалом, например пластмассой, последняя заключается в трубчатый ВТЭ и при взрыве его, испаряясь, оседает слоем на поверхности покрываемого изделия, обеспечивая прочное прилегание. Режим работы в этом случае подбирается таким, чтобы взрыв ВТЭ не сжигал распыляемый материал, а лишь испарял его. Чем более нейтрален или разрежен газ, в котором ведется обработка, тем качество покрытия выше и контакт его с поверхностью более надежен.

Для получения большой толщины покрытия следует либо увеличить толщину ВТЭ (а значит, и увеличить мощность импульса), либо применить повторные взрывы ВТЭ с целью последовательного наращивания толщины наносимого слоя покрытия. Последовательными взрывами различных ВТЭ, выполненных из соответствующих материалов, можно осуществлять биметаллические или даже полиметаллические покрытия, а также покрытия из чередующихся слоев металла и неметалла (например, в радиоэлектронике).

4.10. Электрогидравлическое получение коллоидов и уплотнение порошков

Для дробления и измельчения пластических проводящих материалов (например, металлов или их проводящих соединений) был разработан особый метод измельчения, позволяющий получать как крупнозернистые порошки этих металлов, так и весьма дисперсные — коллоидные — измельчения их [4, 5, 6, 9, 27]. Сущность метода сводится к тому, что разряды и сопровождающие их электрогидравлические удары возникают в местах контакта макрочастиц измельчаемого материала, погруженного в жидкую среду между электродами. При этом основной разряд распадается на десятки тысяч отдельных мелких разрядов, имеющих приблизительно одинаковые параметры, зависящие в данной жидкости (при стабильных параметрах основного разряда) в основном от начальных размеров частиц измельчаемого материала, диаметра ванны и расстояния между электродами. Для заданных параметров ГИТ дисперсность получаемого материала будет тем выше, чем больше диаметр ванны (или расстояние между электродами) и мельче размеры макрочастиц исходного материала.

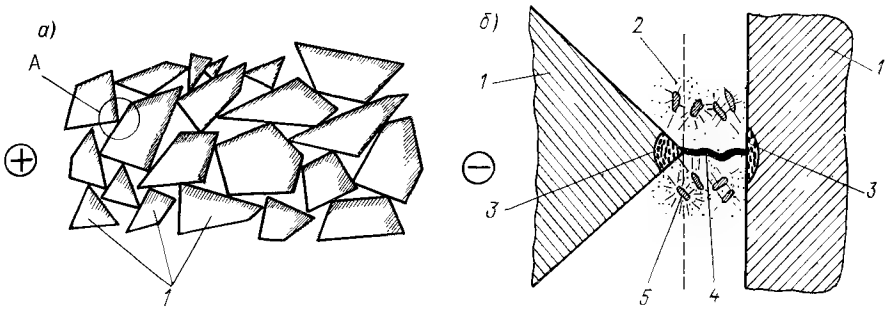


Рис. 4.37. Схема развития процессов при электрогидравлическом получении коллоидов металлов: *а* — контактирование макрочастиц; *б* — процессы в точке *А* контакта макрочастиц;
1 — макрочастицы металла; *2* — коллоидные частицы металла; *3* — лунка, выплавленная в металле разрядом; *4* — канал разряда; *5* — микрокапельки металла, выброшенные из лунки в жидкость

С повышением энергии импульса при заданных диаметре ванны и величине макрочастиц исходного материала дисперсность конечного продукта будет увеличиваться, если возрастание энергии импульса шло за счет повышения напряжения, и уменьшаться, если увеличение энергии импульса шло за счет возрастания емкости накопителя ГИТ.

Физическая сущность происходящих процессов состоит в том, что каждый микрообъем металла, выплавленный микроразрядом, возникающим в точке контакта двух макрочастиц, затем действием микрокавитационного гидравлического удара выбрасывается в виде микрокапелек в жидкость, в процессе этого перемещения еще более диспергируясь действием мощного ультразвукового излучения, сопровождающего каждый электрогидравлический удар [5].

На рис. 4.37, *а* схематично показано, как контактируют между собой макрочастицы исходного материала, а на рис. 4.37, *б* приведена схема процесса диспергирования в одной из точек контакта *А* двух макрочастиц. Макрочастицы контактируют в жидкости не непосредственно, а через ее пограничный слой. Возникающий между частицами разряд выплавляет в каждой из них некоторый объем материала. Выброшенный в виде капелек материал образует коллоид. Во время работы устройства для получения коллоидов металлов можно наблюдать, как при каждом электрогидравлическом ударе возникают десятки тысяч микроразрядов и под действием микроэлектрогидравлических ударов интенсивно перемешиваются частицы материала, контактируя между собой все новыми и новыми участками своей поверхности. С течением времени загруженные в устройство макрочастицы превращаются в правильные шары, постепенно уменьшающиеся в диаметре. Расход энергии на получение коллоидов зависит от свойств

измельчаемого материала, возрастая вместе с его тугоплавкостью и степенью измельчения.

Применение электрогидравлики в порошковой металлургии позволяет получать не только коллоиды всех металлов или проводящих соединений их, но и разнообразные смеси этих коллоидов, одновременно обеспечивая не только идеальное перемешивание их между собой, но и получение коллоидных порошков разнородных металлов в виде смеси микрочастиц их сплавов [27]. Коллоидные порошки металлов, проводящих соединений их, или смесей этих материалов получают в устройстве, принципиальная схема которого приведена на рис. 4.38. Опилки, стружки и другие достаточно мелкие частицы измельчаемых металлов или их проводящих соединений, загруженные в устройство, находятся в нем в состоянии кипящего слоя и интенсивно переходят в коллоидное состояние под действием электрогидравлических ударов. В некоторых случаях для получения относительно крупных порошков на устройство может быть подан и обычный переменный ток промышленной частоты [27].

При получении коллоидов представляет интерес метод распыления в жидкости металлических или других ВТЭ. Коллоид в этом случае получается тем более тонким, чем больше энергия импульса и чем полнее испаряется ВТЭ [6]. А так как при тепловом взрыве диаметр проводника и ток импульса могут быть подобраны таким образом, что проводник после взрыва без остатка обратится в пар, то это дает еще один метод получения коллоидных порошков путем непрерывной подачи на искровой промежуток, расположенный в жидкой или газовой среде, взрывающегося теплового элемента заданного диаметра. Элемент выполняется в данном случае из проволоки большой длины, намотанной на катушку.

Поскольку коллоидные частицы некоторых проводящих материалов могут быть получены и непосредственно из руд (и даже из находящихся под землей), то для тех случаев, когда они могут идти в производственный процесс порошковой технологии сразу и без дополнительной обработки, оба эти способа получения порошков также представляют большой интерес.

Для получения идеально перемешанных смесей коллоидов различных проводящих материалов в устройство (см. рис. 4.38) загружается дозированное количество проводящих материалов, подлежащих измельчению, что и определяет затем заданную пропорцию веществ в конечной смеси их коллоидов. Непроводящий коллоид, необходимый в смеси, добавляется при этом одновременно с загрузкой устройства. В результате контактов разнородных микрочастиц возникают комбинированные коллоидные частицы в виде микросплавов веществ, загруженных в устройство. Одновременно находящиеся в устройстве частицы непроводящего коллоидного порошка также увлекаются в общий процесс и образуют в итоге сложные конгломераты идеально перемешанных

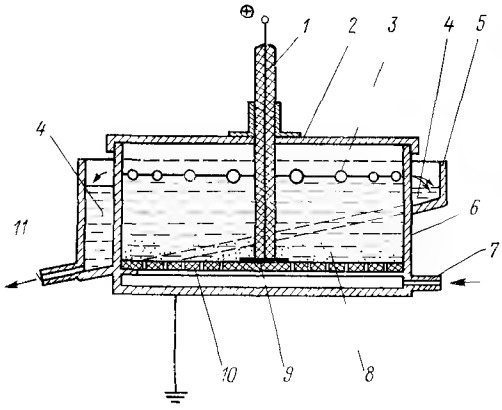


Рис. 4.38. Электрогидравлическое устройство для получения коллоидов различных металлов: *1* — положительный электрод; *2* — планка-держатель электрода, *3* — отверстия в корпусе для выхода коллоида, *4* — сток коллоидного раствора; *5* — кожух стока, *6* — корпус устройства; *7* — подача жидкости или воздуха; *8* — опилки или стружки металла в «кипящем слое»; *9* — контактная пластина положительного электрода; *10* — дырчатое днище из диэлектрика; *11* — выход коллоида

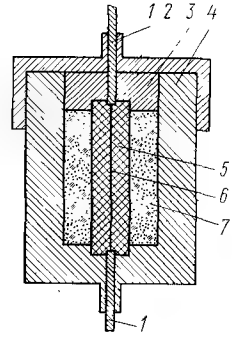


Рис. 4.39. Электрогидравлическое устройство для уплотнения порошков методом теплового взрыва.

1 — токопроводы; *2* — крышка устройства; *3* — уплотняющий вкладыш; *4* — толстостенный корпус устройства; *5* — среда, передающая давления теплового взрыва; *6* — ВТЭ, *7* — уплотняемый порошок

и частично сплавленных коллоидных частиц. Этим способом можно получать жаропрочные и жароупорные сплавы.

Методами электрогидравлики также можно производить и уплотнение порошков, например, располагая различные типы электрогидравлических вибраторов или вибропрессов и синхронизируя их работу таким образом, чтобы уплотняющее воздействие их на порошок осуществлялось одновременно с разных сторон. При уплотнении порошков с помощью теплового взрыва в некоторых случаях целесообразно располагать ВТЭ в самом уплотняемом порошке, используя его как среду, передающую давления теплового взрыва на материал [66]. При этом можно достичь равномерного уплотнения именно тех мест прессуемого изделия, которые при обычных методах прессования практически не уплотняются.

Уплотнение порошков (например, для полых изделий) осуществляется путем размещения в полости будущего изделия резиновой или другой эластичной капсулы, наполненной жидкостью с размещенными в ней электродами, или ВТЭ [71]. В этом случае для более полной и эффективной передачи энергии разряда или теплового взрыва на обрабатываемый материал можно использовать описанный выше метод утяжеления жидкости [85]. Эффективность уплотнения при этом возрастает линейно, пропорционально утяжелению.

Изготовление полых изделий из порошков может осуществляться и без жидкости, как передающей энергию среды, при замене

ее какой-либо пастой (типа глины) или каким-либо эластичным материалом (например, полиэтиленом) с размещением внутри их объема одного или нескольких ВТЭ (рис. 4.39). При этом режим обработки подбирается таким образом, чтобы уплотнение изделия осуществлялось сразу за один прием, так как повторение тепловых взрывов для этого случая и сложно, и конструктивно не всегда осуществимо. В качестве среды, передающей энергию теплового взрыва на обрабатываемый материал, вместо сплошных пластических или эластичных материалов можно применять также какие-либо сыпучие составы. В некоторых случаях, например, при уплотнении изделий большой длины, целесообразно в такие сыпучие составы добавлять небольшие количества смачивающих жидкостей (например, керосина, бензина, эфира, воды), придающих взрыву легко регулируемые метательные свойства.

Из новых областей применения коллоидных порошковых материалов определенными перспективами обладает применение их в сложных многокомпонентных смесях в литейном производстве в качестве материала для приготовления жидкотекучих быстротвердеющих формовочных смесей, в мелиорации для закрепления грунтов, а также в качестве компонентов, улучшающих строительные и другие качества бетонов и пластических масс.

4.11. Электрогидравлические транспортные устройства

Для сообщения судам и другим плавающим средствам реактивного движения при помощи электрогидравлического эффекта предложен принципиально новый электрогидравлический движитель [32, 33]. Под днищем судна помещают электрогидравлическую установку. За счет электрогидравлических ударов, создающих расширяющиеся и захлопывающиеся кавитационные полости, перемещаются значительные объемы жидкости, которые, будучи определенным образом направлены, вызывают движение судна. Установка имеет одну или несколько пар разрядников, помещенных в водопроточной трубе движителя. Для обеспечения движения судна внутри этой трубы установлены решетки, снабженные клапанами. Для упрощения конструкции движителя и использования сил, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, разрядники электрогидравлической установки целесообразно помещать на плоском или вогнутом днище конусообразного обтекателя-отражателя, обращенного острием в сторону движения и придающего результирующим этих сил направление по ходу судна (рис. 4.40, *а*, *б*).

Положительный электрод разрядника пропущен сквозь стенку трубы или отражателя в изоляторе, и острие его помещено в обтекаемой стойке, прикрепленной к стенкам трубы. Отрицательный электрод соединен с корпусом трубы, острие его укреплено в плоской обтекаемой стойке. Искровой промежуток разрядника может быть расположен и перпендикулярно к направлению судна.

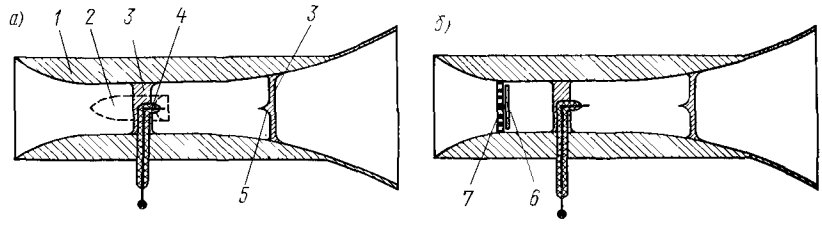


Рис. 4.40. Электрогидравлические движители для плавающих средств: *а* — с отражателем; *б* — с клапанами; *1* — водопроточная труба; *2* — кумулятивный отражатель; *3* — стойка, *4* — положительный электрод; *5* — отрицательный электрод; *6* — клапаны; *7* — отверстия клапанной решетки

В электрогидравлической установке движителя один из электродов может быть выполнен полым с тем, чтобы в момент захлопывания кавитационной полости в нее через полый электрод импульсно подавать газ или жидкость под давлением, близким к давлению на стенках полости. Этим предотвращается захлопывание кавитационной полости, следовательно, устраняется обратное движение жидкости в водопроточной трубе движителя и повышается КПД движителя.

Для перемещения различных транспортных средств с помощью электрогидравлического эффекта может быть использован способ уменьшения трения в трущихся парах или «вибросмазки» [57]. Сущность способа заключается в том, что одному из тел трущейся пары или слою жидкости или газа, находящемуся между трущимися поверхностями, сообщают импульсные колебания, перпендикулярные к направлению движения. Колебания могут быть сообщены любым импульсным источником с возможно более крутым фронтом и малой длительностью импульса, но прежде всего электрогидравлическим.

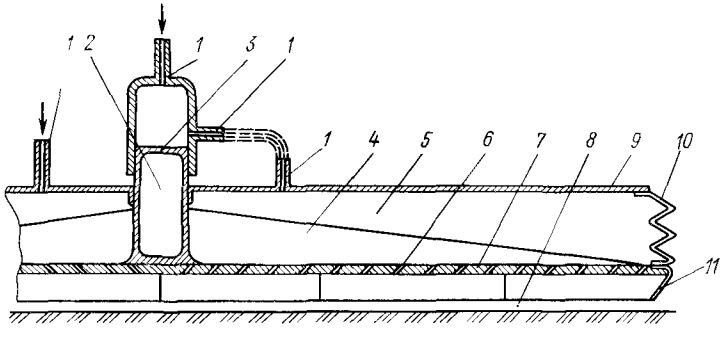


Рис. 4.41. Электрогидравлическое вибротранспортное устройство: *1* — трубопроводы; *2* — полость поршня; *3* — поршень; *4* — ребра жесткости; *5* — полость устройства; *6* — отверстия в днище; *7* — днище; *8* — слой вибросмазки; *9* — площадка кожуха, *10* — гофрированная эластичная мембрана; *11* — эластичный козырек

При сообщении «верхнему» телу импульса колебаний, например, от электрогидравлического вибратора, оно поднимается над плоскостью «нижнего» тела и в зазоре между телами возникает вакуум. В зазор под небольшим давлением подается смазывающая среда (газ или жидкость). Опускаясь, «верхнее» тело уплотнит слой смазывающей среды, но уже не придет в непосредственное соприкосновение с «нижним» телом. Тем самым будет устранено взаимное трение между телами.

Таким образом, движение тел будет осуществляться без непосредственного трения их между собой, с незначительным трением их о жидкость или газ, но с затратой небольшой дополнительной энергии на вибрирование и подачу среды. В результате затраты энергии на взаимное перемещение тел значительно сократятся.

Предложенный способ «вибросмазки» может найти широкое применение в самых различных областях техники, прежде всего на транспорте, решая те же задачи, что и известные средства на воздушной подушке. Один из вариантов вибротранспортного устройства для передвижения по поверхности воды или земли приведен на рис. 4.41. Несущий элемент устройства — днище — покрыт сеткой отверстий, наклонных к центру днища для сохранения слоя вибросмазки. Для этого же служат и эластичные козырьки, «бахромой» окружающие днище. Увеличению жесткости днища способствуют ребра жесткости, связывающие днище с одним из полых поршней электрогидравлического вибратора — источника импульсов. Жидкость или газ может подаваться самостоятельно или по трубопроводам в полость, образованную днищем, кожухом и боковой гофрированной эластичной мембраной. Транспортное устройство перемещается по поверхности воды или земли на слое вибросмазки. Двигатели, помещения, груз и пассажиры размещаются на площадке кожуха устройства.

Глава 5

Использование электрогидравлического эффекта в горном деле и промышленности строительных материалов

5.1. Электрогидравлические взрыватели

Возможности электрогидравлического эффекта, выяснившиеся в процессе исследований, позволили предложить использовать его при производстве различных взрывных работ в горном деле [19]. Было предложено несколько основных типов электрогидравлических взрывателей, применение которых целесообразно при производстве следующих работ: проход штреков шахт и тоннелей непрерывным способом; освобождение прихваченных буровых обсадных труб; гидравлический разрыв пластов; взрывание хрупких металло- и ионопроводящих материалов, руд, шлаков, чугунного лома; взрывание блоков технических камней электрокорунда; очистка фильтров водозаборных скважин; штучная выработка кристаллов (например, горного хрусталя, слюды); производство подводных взрывов при расчистке и углублении фарватеров; взрывание льда и мерзлого грунта; разрушение камней в мочевом музыре и мочеточниках больных[1].

Были разработаны, испытаны и внедрены взрыватели, в частности, для производства камнедобывающих работ (бутового и штучного камня), безосколочного взрывания валунов на полях, разрушения бетонных и железобетонных фундаментов внутри зданий, в условиях действующего производства и др. [5, 7, 8, 9, 37, 62, 67, 68].

Для осуществления электрогидравлического взрыва в подлежащем взрыванию материале бурится неглубокий (глубиной до 500 и диаметром до 40 мм) шпур. Затем шпур заполняется водой и в него помещается электрогидравлический взрыватель, представляющий собой рабочий искровой промежуток ГИТ. При подаче на рабочий искровой промежуток электрических импульсов в шпуре возникают электрогидравлические удары, разрушающие материал.

Различные виды электрогидравлических взрывателей разделяют на две основные группы: взрыватели для разрушения нетокопроводящих материалов и взрыватели для токопроводящих

[1] За участие в разработке этой проблемы Л. А. Юткину посмертно была присуждена Государственная премия УССР за 1981 г.

материалов. Взрыватели должны обладать следующими свойствами: достаточной портативностью и небольшой массой; возможностью осуществления взрывов в вертикальных, горизонтальных и потолочных шпурах; минимальным расходом воды на взрывание; возможностью в случае необходимости осуществить направленный раскол; максимальной безопасностью в обращении; легкой взаимозаменяемостью элементов и возможностью быстрого отключения взрывателя при его неисправности.

Электрогидравлические взрыватели для нетокопроводящих материалов. Для осуществления электрогидравлического взрывания нетокопроводящих материалов могут использоваться электрогидравлические взрыватели нескольких модификаций [8, 9, 37, 62, 67, 68]. Простейший электрогидравлический взрыватель представляет собой погруженный в пробуренный шпур рабочий искровой промежуток, образованный, например, нижними концами изолированного центрального и накладного электродов.

Другой вариант исполнения электрогидравлического взрывателя представляет собой внутренний центральный изолированный электрод и внешний трубчатый электрод, снабженный в верхней части штуцером для подачи жидкости через концентрический зазор в отверстие между электродами. Оба электрода могут быть также выполнены трубчатыми, а подача жидкости в отверстие производиться через полый внутренний электрод [9]. Для предотвращения выброса воды из шпура и повышения эффективности взрывания все типы электрогидравлических взрывателей могут быть снабжены гидравлической пробкой, выполненной в виде гибкого рукава с двумя фланцами — верхним и нижним, перекрывающими выход из отверстия. Пробка заполняется жидкостью (или смоченным песком) и снабжается снизу резиновой подушкой. Также может применяться накладной съемный груз.

Электрогидравлические взрыватели для нетокопроводящих материалов в зависимости от их технологического назначения можно разделить на ряд основных типов.

Взрыватель первого типа (рис. 5.1, *а*) имеет строго локализованный разряд, может использоваться для направленного раскола и представляет собой высоковольтный кабель с центральной жилой и верхней оплеткой на плотной посадке, помещенный в металлическую трубу. При этом оплетка кабеля электрически соединяется зажимной муфтой с трубой взрывателя, нижний косой срез которой является одним из электродов разрядного промежутка. Нижний отогнутый конец центральной жилы кабеля выступает на 10—20 см ниже обреза трубы, образуя второй электрод. Для подсоединения взрывателя к упорной стойке при взрывании горизонтальных и потолочных шпуров служит съемное упорное кольцо. Регулировка искрового рабочего промежутка достигается вращением по резьбе соединительных труб в опорной плите. Величина заглубления взрывателя в шпур может изменяться выдвижением труб в опорной плите или удлинением самих труб.

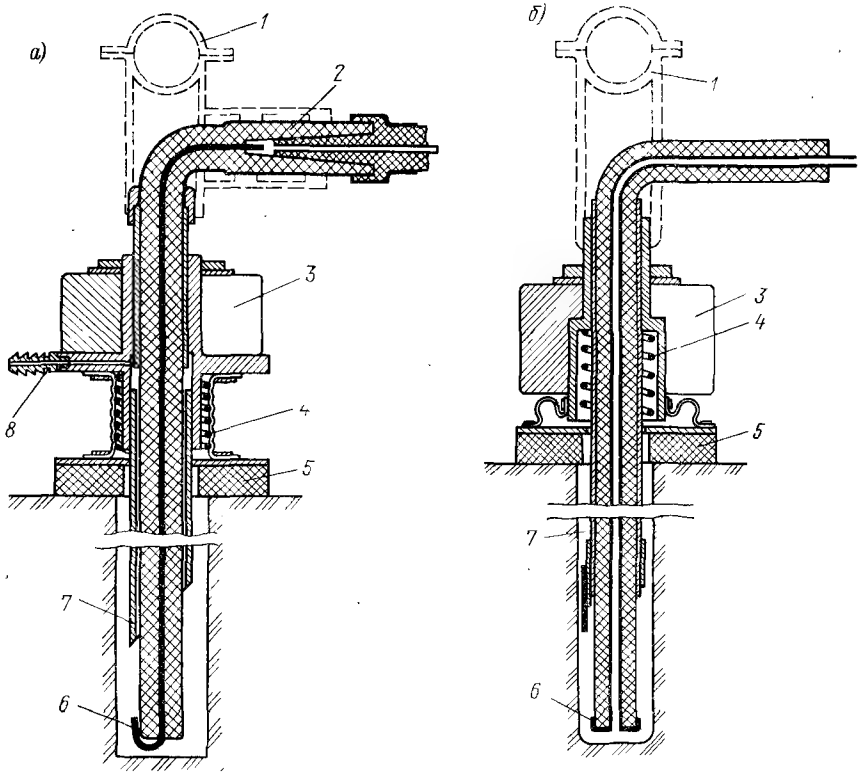


Рис. 5.1. Электрогидравлические взрыватели: *а* — «направленного раскола»; *б* — «грязного забоя»;
1 — съемное упорное кольцо, *2* — высоковольтная соединительная муфта, *3* — накладной груз; *4* — амортизирующая пружина; *5* — кольцевая эластичная подушка; *6* — центральный положительный электрод, *7* — труба взрывателя — отрицательный электрод; *8* — штуцер для подвода воды

При взрывании вертикальных шпуров съемного упорного кольца не требуется. Для взрывания горизонтальных и потолочных шпуров необходимо взрыватель закрепить упором (съемный груз при этом не нужен). В случае неисправности взрыватель легко отключается от линии коаксиального кабеля муфтой и заменяется другим.

Взрыватель второго типа отличается от предыдущего системой подачи воды, которая осуществляется не через трубчатый внешний электрод, а непосредственно в гидравлическую пробку, откуда она самотеком попадает в шпур. Разряд локализован. Конструкция взрывателя позволяет в широких пределах изменять величину его заглубления в шпур. Взрыватель целесообразно использовать для мелкого дробления объектов с глубокими шпурами, где получение направленности раскола не требуется. Регулирование длины рабочего искрового промежутка осуществляется

вращением муфты по резьбе трубы, регулирование величины заглубления взрывателя в шпур обеспечивается вращением трубы в резьбе опорной плиты.

Взрыватель третьего типа (рис. 5.1, *б*) может быть назван взрывателем «грязного забоя» [41]. Вода здесь подается через полый центральный электрод. Шпур перед взрывом засыпают песком или грунтом. Вследствие того что вода подается к самому дну забоя, взрыватель наиболее пригоден для взрывания горизонтальных или потолочных шпуров при условии, если сечение отверстия центрального электрода позволяет обеспечить расход воды, необходимый для заполнения шпура. Регулирование положения и длины рабочего искрового промежутка обеспечивается вращением по резьбе трубы трубчатой муфты с наварным пальцем, регулирование заглубления взрывателя в шпуре – вращением трубы в резьбе опорной втулки. Снижение расхода воды при взрывании методом «грязного забоя» и более высокий КПД этого взрывателя позволяют широко использовать его на практике.

Во всех трех типах взрывателей взрыватель смонтирован в одно целое с гидравлической пробкой. Это приводит к некоторому утяжелению взрывателя, а иногда взрыватель «грязного забоя» затрудняет работу с ним при засыпке в шпур песка. Поэтому при взрывании вертикальных шпуров целесообразно использовать такие конструкции взрывателей, в которых корпус взрывателя не связан с гидравлической пробкой. При взрывании шпуров глубиной более 500 мм применение гидравлической пробки не является обязательным. Выброс воды из глубоких шпуров очень невелик, и потери давления, вызванные этим выбросом, незначительны.

При электрогидравлическом взрывании расход воды подбирается так, чтобы постоянно заполнять шпур, восполняя выброс воды после каждого удара в промежутке между ударами (при взрывании без гидравлической пробки), а при взрывании с гидравлической пробкой постоянно заполнять на 10–14 см по высоте эластичный рукав пробки.

При взрывании методом «грязного забоя» подача воды подбирается таким образом, чтобы, не вымывая из шпура засыпанный в него песок, постоянно смачивать его. При этом песчано-гидравлическая пробка надежно перекрывает выход из шпура, в силу чего всякие выбросы из шпура практически прекращаются и в нем развиваются мощные продольные усилия, вызывающие появление поперечных трещин, которые способствуют выбиванию «дна» шпура. При взрывании монолитов образование поперечных трещин повышает эффективность электрогидравлического способа взрывания (например, для разрыва пластов в нефтяных скважинах, а также осуществления так называемого направленного раскола).

Сущность метода направленного раскола состоит в том, что помещенный в шпур и определенным образом ориентированный взрыватель обеспечивает необходимую направленность основной

трещины разрыва (в любом заданном направлении). Основная трещина точно совпадает по направлению с плоскостью, проведенной через два электрода.

Кроме основной трещины, при взрыве обычно возникает вторая, перпендикулярная к основной, но значительно меньшая по размерам трещина, а затем, по мере увеличения числа или энергии импульсов, появляются и другие трещины.

Помещая в шпур длинные эластичные стержни или пластины и определенным образом ориентируя их, можно существенно ослабить или полностью устранить возникновение перпендикулярной трещины, что особенно важно для плинтовки штучного камня.

Исследования показали, что при электрогидравлическом взрывании негабаритов все трещины обычно возникают только по образующим шпура, но при взрыве методом «грязного забоя» возникают и небольшие, поперечные шпуру трещины. Трещины всегда сначала образуются в нижней части забоя — вблизи зоны разряда, а затем с каждым последующим ударом начинают распространяться в стороны и преимущественно вверх — к устью забоя, пока не достигнут наружной поверхности. После того как основная трещина дошла до устья шпура, она начинает быстро расширяться от него в обе стороны, выходит на края камня и камень раскалывается сверху вниз. Это характерное направление развития трещин получило название «клинового эффекта». Перпендикулярная к основной вторая трещина обычно следует в своем развитии за основной, несколько отставая от нее во времени появления и развития.

Внутренняя структура камня хотя и оказывает некоторое влияние, но не определяет основные направления и начальную ориентацию основных трещин. Однако трещины развиваются и проходят поперек или под небольшим углом к внутреннему ожелезнению в камне, пересекают под углом небольшие краевые трещины.

Действительно, «чистую» картину разрыва можно наблюдать только на однородных монолитных образцах, на которых поверхность разрыва представляется совершенно плоской и ровной. На менее совершенных образцах плоскость разрыва, оставаясь ровной вблизи шпура, к краям искажается, следуя слоистости или внутренней трещиноватости камня.

Изучение забоя шпура после электрогидравлического взрывания показало, что камень постепенно разрывается изнутри за счет уплотнения материала. Трещины в нем, постепенно нарастая, расходятся в зоне шпура на ширину до 10 мм, хотя периферия камня остается при этом еще совершенно целой. Поскольку в шпурах после взрыва не было замечено никаких следов песка или мелких обломков, факт раздвигания трещин за счет уплотнения материала, а не за счет разрушения его, следует считать установленным.

Давления, возникающие в шпуре при электрогидравлическом взрывании, настолько велики, что в состоянии разрывать достаточно большие негабариты. Потери давления в шпуре тем больше, чем мельче шпур, а выход трещин на свободную поверхность тем легче, чем эта поверхность ближе к шпуру. Таким образом, не слишком глубокий шпур в этом отношении будет выгоднее глубокого, так как трещины мелкого шпура раньше выходят на поверхность и клиновый эффект проявляется быстрее. Однако положение это имеет смысл только при работе на относительно малых емкостях. Если установка для взрывания располагает емкостью порядка 5—6 мкФ при напряжении 100 кВ, то монолит объемом 1—2 $м^3$ раскалывается практически за один-два удара, что оказывается рациональнее потерь времени на переключение емкостей.

Определенное значение для эффективности взрывания имеет и расположение шпуров относительно центральной оси взрываемого объекта. Исследования показали, что эксцентрично расположенные шпуры положительно влияют на разрушение объектов, так как при этом трещины быстрее выходят к ближайшей свободной поверхности негабарита и взрыв несколько ускоряется. Таким образом, эксцентричное расположение шпуров рационально применять в случаях ненаправленного взрывания негабаритов.

При взрывании шпуров глубиной более чем $^4/_5$ от диаметра объекта по направлению шпура, «дно» шпура становится относительно тонким и, как правило, вырывается из камня прежде, чем он разрушается. Вырванное «дно» шпура всегда имеет форму конуса с характерным углом при вершине, равным 110—120 °, обращенным основанием к свободной поверхности камня. Вершиной конуса всегда, очень точно по контуру, является «дно» забоя шпура. Такие объекты с вырванным «дном» и образовавшимся сквозным шпуром далее могут быть снова подвергнуты взрыванию после создания «искусственного дна» шпура путем забивания в устье или в вырванную часть дна забоя небольшой деревянной пробки длиной 60 -80 мм. При этом объект опускается нижней частью на пробку, подсыпанную песком, и взрывание осуществляется, как обычно. Пробки не вылетают и хорошо работают. Это объясняется тем, что песок под влиянием высоких давлений проникает на 2—3 см в глубь древесины, расклинивая пробку в шпуре. Образование характерных трещин у «дна» шпура, расходящихся вниз под углом 110—120°, наблюдается во всех случаях, но трещины эти при большой толщине «дна» шпура, как правило, не уходят в глубь камня более чем на 5 8 см.

Аналогичные результаты получаются и при взрывании фундаментов. Так, исследование одиночных шпуров, заложенных далеко от краев фундамента, показывает, что после электрогидравлических ударов в них наблюдаются такие же выкалывающие трещины, идущие под углом вверх. При взрывании фундаментов расход энергии, идущий на разрушение, тем выше, чем вязче

взрываемый материал. Выход трещин на поверхность быстрее всего отмечается на железобетонных и бетонных объектах, затем на цементно-кирпичных и в последнюю очередь на известково-кирпичных фундаментах. Повышение расхода энергии при взрывании известково-кирпичных фундаментов имеет место еще и потому, что в шпурах вокруг зоны разряда отмечается появление значительных по объему камуфлетных полостей (до 300 мм диаметром и 400 мм длиной), стенки которых состоят из частично разрушенного и частично уплотненного материала фундамента. Наличие таких полостей резко снижает ударные давления, быстро гаснущие по мере удаления от зоны разряда. При взрывании железобетонных фундаментов не происходит разрыва арматуры, хотя трещины, обнажающие арматуру, возникают. Камуфлетные полости в цементно кирпичных, цементно-щебеночных и железобетонных фундаментах не наблюдались.

В необходимых случаях можно осуществить одновременный взрыв сразу нескольких шпуров с любой степенью запаздывания каждого последующего взрыва. Это достигается специальной схемой ГИТ электрогидравлической установки. Учитывая, что КПД преобразования электрической энергии в механическую составляет примерно 50 %, энергия, необходимая для разрушения валуна объемом 1 м^3, должна быть около 45 кДж. В то же время известно, что для разрушения такого же валуна с помощью ВВ требуется заряд тротила массой 0,2 кг, что соответствует 800 кДж, причем только 2,5 % энергии ВВ расходуется на процесс раскалывания негабаритов. Остальная часть передается породе и идет на разлет осколков, пластическую деформацию и т. д. В отличие от взрыва с помощью ВВ при электрогидравлическом взрывании практически не происходит пластической деформации, валун раскалывается на 2—4 части без разлета осколков.

При выборе параметров ГИТ для электрогидравлического разрушения валунов следует использовать относительно небольшое рабочее напряжение (5—10 кВ), т. е. напряжение, при котором достигаются минимальные габаритные размеры и масса этого узла, необходимые для высокой мобильности установки.

Установка для электрогидравлического взрывания может быть выполнена стационарной и передвижной. Так, для взрывания негабаритов, помещающихся в ковш экскаватора, или для выборки мерзлых грунтов она может быть смонтирована на самом экскаваторе, для чего выдвижные взрыватели могут быть вмонтированы в ковш. Для взрывания негабаритов, не прошедших через колосниковую решетку, или в случае невозможности их взрывания непосредственно на самой решетке дробильных или транспортных устройств установка может быть смонтирована вблизи них как стационарная.

Однако наиболее широкие возможности имеют передвижные установки, которые могут выполнять работы как по взрыванию валунов на полях, негабаритов на карьерах, фундаментов различ-

ных сооружений, так и по разработке карьеров и горных выработок. В этом случае в зависимости от назначения установку можно монтировать на автомашине, прицепе, вагонетке, железнодорожной платформе, судне. Разработанная передвижная электрогидравлическая установка модели «Вулкан К-32» для безосколочного раскалывания валунного камня в полевых условиях размещается на двухосном прицепе с фургоном. Установка вместе со встроенным дизель-генератором транспортируется к месту проведения взрывных работ.

Техническая характеристика установки:

Максимальная энергия импульса, кДж	80
Рабочее напряжение, кВ	5
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	6400
Длительность зарядного цикла, с	40
Радиус действия (длина кабельного вывода), м	20
Производительность, $м^3$/смену	30 60
Обслуживающий персонал, чел	2
Питающая сеть:	
напряжение, В	220
число фаз	3
частота, Гц	50
Потребляемая мощность, кВт·ч/$м^3$	0,20

Управление установкой и разрушение валунов осуществляются оператором с пульта управления. Годовая экономическая эффективность от эксплуатации одной такой установки для разрушения валунов объемом 1 2 $м^3$ до фракций 0,45 $м^3$ составляет около 18 тыс. руб. В настоящее время электрогидравлические установки этой модели выпускаются серийно. Одновременно был предложен и блочный вариант такой установки (модель «Эгурн») для применения внутри цехов и других помещений.

Техническая характеристика установки:

Рабочее напряжение, кВ	6
Энергия импульса, кДж	150
Потребляемая мощность, кВт·ч/$м^3$	0,20
Производительность установки при расколе, $м^3$/ч:	
бетонных конструкций	8 10
железобетонных конструкций	1,0—2,5

Разработаны и другие модели установок для электрогидравлического взрывания.

Значительно расширяет возможности электрогидравлического взрывания применение для этих целей метода «теплового взрыва» [23]. В зависимости от цели и материала объекта взрывания токопроводящему взрывающемуся тепловому элементу (ВТЭ) придают различную форму и по-разному располагают его относительно взрываемого объекта [62].

На рис. 5.2, *а* изображено устройство, в котором ВТЭ расположен в непосредственной близости от разрушаемого объекта. В емкости, заполненной водой, размещен отражатель, который

своими ножками опирается на разрушаемый объект. На отражателе закреплена пара электродов, подключаемых кабелем к ГИТ. Между электродами, вблизи поверхности разрушаемого объекта, натянут проволочный ВТЭ. При подаче на ВТЭ импульса тока элемент взрывается, возникает электрогидравлический удар, разрушающий объект. Для предотвращения утечки жидкости емкость снабжена губчатой уплотняющей прокладкой с грузом, которая прижимается к разрушаемому объекту. В таком устройстве ВТЭ может быть также выполнен и в виде ленты. При взрыве ленты возникает продольно направленная ударная волна, вызывающая раскалывание объекта в плоскости расположения ленты. В том случае, когда необходимо получить кумулятивный взрыв, ВТЭ придают форму конусообразной спирали. Спираль погружается в жидкость и также подключается к двум электродам, при этом она может касаться поверхности разрушаемого объекта.

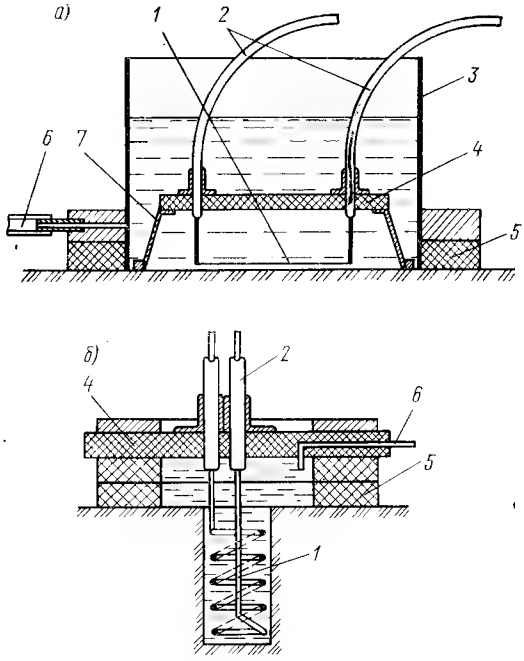


Рис. 5.2. Устройства для электрогидравлического взрывания монолитных объектов с помощью теплового взрыва: *а* — накладным ВТЭ; *б* — ВТЭ, погруженным в шпур; *1* — ВТЭ, *2* — кабели, *3* — емкость; *4* — отражатель; *5* — губчатая уплотняющая прокладка, *6* — водоподвод; *7* — ножки отражателя

Оба вышеописанных варианта относятся к разрушению объектов так называемым накладным зарядом и используются главным образом при электрогидравлическом взрывании негабаритов и других объектов, находящихся под водой.

Разрушение объекта возможно и при некотором заглублении в него ВТЭ. В этом случае (рис. 5.2, *б*) токопроводящий ВТЭ в форме цилиндрической спирали размещают в неглубоком шпуре, заполненном жидкостью или увлажненным песком, и подключают к двум электродам, вмонтированным в отражатель, который прижимают к поверхности разрушаемого объекта.

Для получения направленного раскола объекта, ВТЭ, расположенному в шпуре, может быть придана форма одновитковой петли. При взрыве такого ВТЭ трещина раскола пройдет перпен-

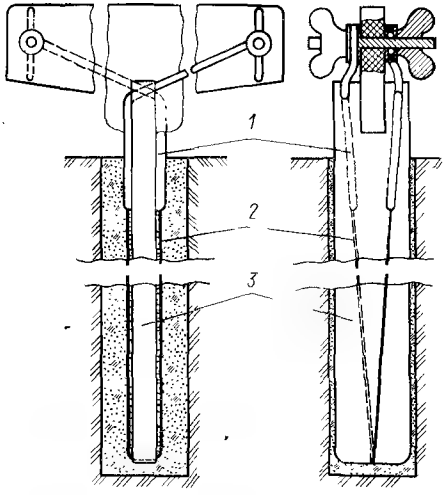


Рис. 5.3. Устройство для управления направленностью взрыва с помощью ВТЭ: *1* — электроды; *2* – проволочный ВТЭ; *3* – пластинка диэлектрика

дикулярно к плоскости его расположения. Направленный раскол объекта можно осуществить и с помощью ВТЭ в виде ленты, которая кроме поперечного изгиба дважды изогнута в продольном направлении и размещена в неглубоком шпуре. Использование трубчатого ВТЭ целесообразно в тех случаях, когда для повышения эффективности разрушения ВТЭ, наполняют взрывчатым веществом.

Если между электродами электрогидравлического взрывателя расположить пластину из диэлектрического материала, на которую натянуть токопроводящий взрывающий тепловой элемент (рис. 5.3), то это также обеспечит необходимую ориентацию трещины раскола в разрушаемом объекте, позволит лучше управлять результатами взрыва [67].

Из практики известно, что даже очень мощный электрогидравлический удар почти не обладает метательными свойствами. При разрушении больших каменных блоков или крупнокристаллических горных пород на разъединение расколовшихся при электрогидравлическом ударе кусков нужно затратить дополнительную работу.

Повышать метательные свойства электрогидравлического удара можно путем изменения состава и количества жидкости, смачивающей материал,— наполнитель шпура [68]. Так, если необходимо произвести электрогидравлическое взрывание негабарита без заметного раздвигания расколовшихся частей, материал наполнитель шпура должен быть увлажнен жидкостью, которая при импульсном нагреве и последующем испарении ВТЭ дает минимум парообразования. Этим требованиям отвечает водопроводная вода.

Если же ставится противоположная цель — повысить метательные свойства электрогидравлического удара, то увлажняющая жидкость должна образовывать при тепловом взрыве ВТЭ достаточное количество паров, что будет способствовать более длительной передаче усилий электрогидравлических ударов на разрушаемый объект. Жидкостями, отвечающими этим требованиям, будут хорошо смачивающие, легколетучие и быстроиспаряющиеся жидкости — керосин, бензин, спирт, эфир.

Жидкость вводят в нижнюю часть шпура после засыпки его материалом наполнителем (диэлектриком, например, пылью, песком), регулируя метательные свойства взрыва количеством капель этой жидкости.

Повышения метательных свойств взрыва (например, для разрушения мягких пород) можно достичь и специальным электрогидравлическим взрывателем, включающим коаксиально расположенные электроды, разделенные изоляционной трубкой. При этом наружный электрод выполнен в виде набора параллельных скоб, закрепленных на изоляционной трубке, а внутренний электрод имеет вывод на наружную поверхность этой трубки.

Такая конструкция электрогидравлического взрывателя позволяет равномерно распределить энергию давления ударной волны, так как импульс напряжения одновременно пробивает все последовательно соединенные разрядные промежутки, создавая равномерно распределенное давление с амплитудой, меньшей, чем при одинарном разрядном промежутке такой же длины. Тем самым обеспечивается возникновение ударной волны, разрушающей мягкую горную породу без образования локальных повреждений внутренних стенок шпура (камуфлетных полостей).

За счет использования энергии электрогидравлического эффекта может быть обеспечено и выполнение такой трудоемкой операции, как срезание верхушек свай без разрушения их рабочей части. Эту работу можно выполнить как обычным электрогидравлическим взрывателем, погружаемым в пробуренный в верхушке сваи шпур, так и с помощью устройства, основанного на действии теплового взрыва ВТЭ. В этом случае ВТЭ в виде тонкой проволоки или кумулирующей ленты обтягивает сваю по ее периметру. ВТЭ погружают в составную ванну с рабочей средой. Давления, возникающие при взрыве ВТЭ, передаются свае, по линии наложения ВТЭ разрушается бетон, обнажается арматура, и после ее разрезания обычным способом верхушка сваи легко отделяется от рабочей части без повреждения. В этом случае в качестве рабочей среды может быть использована вода, сухой или мокрый песок, мокрая или жидкая глина и т. д. [66]. Слой рабочей среды над ВТЭ и во все стороны от него должен быть не менее 20 см. Если линия отделения верхушки сваи находится ниже уровня воды, то никакой ванны не требуется.

Электрогидравлические взрыватели для токопроводящих материалов. Необходимым условием осуществления электрогидравлического разрушения всякого проводящего материала является устранение возможности возникновения короткого замыкания разряда на проводящие стенки шпура — отверстия в металле. Это достигается осуществлением разряда внутри вставляемой в отверстие в металле резиновой трубки (пальца), заполненной водой.

Поскольку при взрывании никаких требований к точности операции не предъявляется, то задача конструирования приспо-

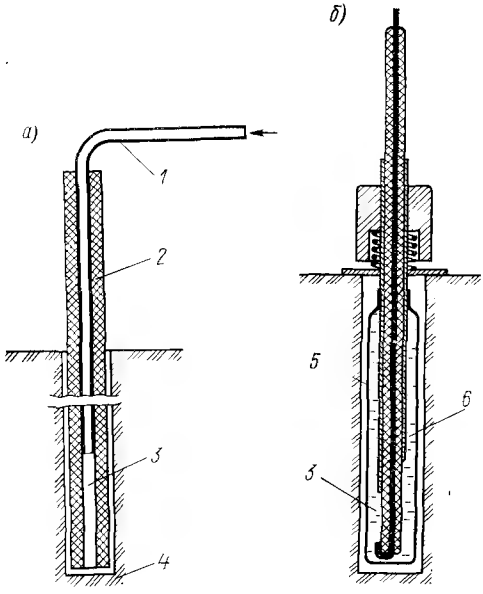


Рис. 5.4. Электрогидравлические взрыватели для нерастворимых в воде (*а*) и растворимых в воде (*б*) проводящих материалов:
1 положительный электрод; *2* толстостенная резиновая трубка; *3* рабочий искровой промежуток; *4* — дно забоя шпура (отрицательный электрод); *5* — эластичная оболочка; *6* — вода

собления взрывателя значительно упрощается. На рис. 5.4, *а* изображен электрогидравлический взрыватель для токопроводящих материалов. В толстостенную вакуумную резиновую (или полиэтиленовую, капроновую, нейлоновую) трубку вставляется центральный трубчатый электрод. Трубка электрода не доходит до конца резиновой трубки на 5—8 см, образуя внутри резиновой трубки, между дном забоя шпура и электродом, рабочий искровой промежуток. «Дно» шпура в проводящем материале является вторым, отрицательным, электродом. Вода непрерывно подается через полость пустотелого трубчатого положительного электрода. Глубина шпура — отверстия в проводящем материале — в данном случае составляет не более 15 см. Гидравлическая пробка может быть применена и здесь. Этим методом можно осуществлять взрывание негабаритов сильно проводящих горных пород, крупных шлаковых блоков, доменных «козлов», а также дробление крупного чугунного и другого хрупкого металлического лома. Этим же методом можно взрывать как пласты, так и негабариты соли. Успешно прошли и опыты, проводимые в начале 50-х годов, по взрыванию мерзлого грунта и льда.

Для электрогидравлического взрывания хрупких соляных монолитов кроме предложенной конструкции взрывателя может быть использован взрыватель с постоянным объемом воды (рис. 5.4, *б*), в котором передний конец обычного взрывателя окружен сравнительно тонкостенным резиновым или другим эластичным мешком-оболочкой, заполненным постоянным объемом воды.

Взрыватель вместе с оболочкой и водой в ней вставляется в шпур и взрыв осуществляется обычным способом. Электрогидравлическое взрывание токопроводящих материалов может быть осуществлено также методом электрического теплового взрыва ВТЭ.

Расчеты экономической эффективности электрогидравлического взрывания показали, что стоимость взрывания 1 м^3 негабаритов составляет около 50 коп., что на 30—45 % ниже стоимости традиционного метода взрывания. Однако в эти расчеты не входит экономия, которая возникает от отсутствия пыли и взрывного газообразования при электрогидравлическом взрывании, от устранения возможности заболевания силикозом. Огромный экономический эффект возникает и в связи с тем, что при электрогидравлическом взрывании нет необходимости прекращения работ во время осуществления взрыва, вывода людей и отвода техники на большие расстояния или за укрытия. Основные работы могут продолжаться непрерывно. Это свойство электрогидравлического взрыва особенно ценно при производстве взрывных работ в черте города, при разборке фундаментов или других элементов строений и сооружений внутри зданий, в обстановке действующего производства.

Значительные преимущества новому методу взрывания должна дать и возникающая с его появлением новая, непрерывная электрогидравлическая технология производства буровзрывных работ, т. е. когда все элементы электрогидравлического бурения и взрывания совмещены и могут осуществляться практически одновременно по всей линии фронта работ.

Также весьма важно то, что эта же электрогидавлическая силовая установка может быть использована для электрогидравлической сейсморазведки, а также для выполнения многих других работ, например забивания свай, шпунта и т. д.

5.2. Электрогидравлические устройства для бурения и резания горных пород

Электрогидравлическое бурение [7, 8, 9, 22, 41], при котором электрическая энергия непосредственно в самом забое переходит в механическую работу, разрушая горную породу, является принципиально новым способом бурения. Для его осуществления предназначены электрогидравлические буры различных типов и модификаций.

В зависимости от конструкции и назначения бура электродов в буре может быть два или несколько; они могут быть неподвижными, вращающимися, а также совершать колебательные движения. Движение электродов может осуществляться либо от постороннего источника (движителя), либо за счет энергии проходящей воды, либо силой действия самих электрогидравлических ударов. Силовая установка (ГИТ), питающая бур, может быть как наземной, так и погружной.

Буровая коронка может выполняться как сидящей на буровой водовводной штанге, так и прямо на обсадной трубе или внутри нее, или же просто подвешиваться на тросе. Буровой снаряд выполняют также и в виде «торпеды», совмещающей образование

скважины с процессами уплотнения грунта и закрепления стенок скважины.

Предложенные электрогидравлические буры конструктивно делятся на четыре основные группы.

Электрогидравлические буры с вращающимся центральным электродом. Экспериментально доказано, что буры сплошного забоя этого типа при напряжении 70—100 кВ и емкости 0,7—1,0 мкФ могут бурить крупные скважины диаметром до 450—500 мм. Вращение переднего конца центрального электрода осуществляется различными способами (например, от электромотора, турбинки, приводимой в движение промывочной водой, поступающей по трубе бура, а также от реактивного действия самих электрогидравлических ударов). Буровая коронка для этих буров при небольших энергиях импульса может быть выполнена сплошной, с гладким или зубчатым краем. При больших энергиях импульса коронка должна выполняться эластичной (например, из отдельных тонких эластичных проволок) [7].

В бурах сплошного забоя с вращающимся центральным керном впервые применена водяная изоляция для отрицательного электрода. Токопроводящий шланг выполняют из тонкостенной резиновой трубы, заполненной водой. Вода свободно проходит внутри шланга через отверстия в шайбах, центрующих электрод по оси шланга. На рис. 5.5 изображен один из первых вариантов электрогидравлических буров такого типа. Внутри металлической трубки-коронки, зазубренной с торца, помещен изолятор с отверстием для промывочной жидкости. В центре изолятора, в трубчатом подшипнике, свободно вращается положительный электрод, ток к которому подводится скользящим контактом. Нижний конец электрода отогнут под прямым углом на 5—10 мм. Вблизи торца трубка имеет отверстия для выхода газов и паров. При подаче импульсов тока на трубку коронку и электрод между отогнутым концом последнего и ближайшим к нему зубцом коронки возникают разряды. При вращении электрода эти разряды последовательно, с зубца на зубец, обегают периметр нижнего неподвижного торца трубки. Возникающими электрогидравлическими ударами разрушается порода, на которую поставлена трубка. Измельченная порода выходит между зубцами через зазор между трубкой и стенками отверстия, откуда вымывается водой, принудительно подаваемой через полость устройства [22].

Конструктивно бур кольцевого забоя этого типа аналогичен буру сплошного забоя, вращение центрального трубчатого электрода осуществляется в нем теми же способами. Буры этого типа при напряжении до 50—80 кВ могут образовывать круглые скважины любого диаметра при ширине разбуриваемого кольца около 30 -50 мм [9].

Вращением с частотой 10—15 об/мин внутреннего цилиндра, имеющего нижний косой срез, который играет роль разрядного острия, достигается обегание разрядами периметра нижнего тор-

ца коронки между острием цилиндра и ближайшим зубцом коронки. Образующийся при прошивке керн входит во внутреннюю полость цилиндра и затем может быть извлечен; вода подается через отверстие в теле бура.

Опытным путем установлено, что при напряжении 70—100 кВ, емкости 0,7—1,0 мкФ и разрядах длиной до 220—250 мм можно получить отверстия сплошного забоя диаметром до 450—500 мм. Твердость пород для образования отверстий значения не имеет [7, 8].

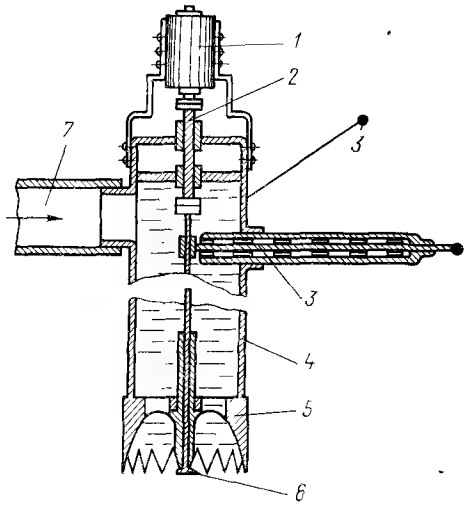


Рис. 5.5. Электрогидравлический бур с вращающимся центральным электродом: *1* — электродвигатель, вращающий центральный электрод; *2* — вал, передающий вращение; *3* — токопроводы; *4* — трубчатый корпус бура; *5* — коронка бура — наружный электрод; *6* — центральный вращающийся электрод; *7* — подача воды

Электрогидравлические буры с неподвижным центральным электродом (буры «грязного забоя»). Осуществление вращения центрального электрода значительно усложняет конструкцию бура. Попытки выполнить центральный электрод невращающимся сталкивались с невозможностью соблюдения точного осевого положения центрального электрода, а это приводило к тому, что разряды развивались преимущественно по кратчайшему радиусу или вблизи него, в пределах небольшого угла, что нарушало условия работы бура.

В ходе исследований по созданию бура с неподвижным центральным электродом была выявлена зависимость пробивного напряжения в жидкости от массового содержания в ней каких-либо механических примесей и предложен метод так называемого «грязного забоя», а также был создан бур [41] сплошного забоя, использующий этот метод (рис. 5.6). При диаметре бура 40 мм и затрате энергии 25 Вт бур позволяет получить следующие скорости бурения, см/мин:

Гранит раппакиви	2
Криворожская железная руда	8
Бетон на гранитном песке крупностью 3—5 мм	50

Приданием концу центрального электрода тарельчатой формы удалось добиться устойчивой работы бура без разрушения его изоляции. Проведенные исследования поведения и распределения электрических силовых полей позволили предусмотреть в конструкции бура возможности работы в режиме обратной полярности

и ввести небольшой зазор между изоляцией и «тарелочкой», удлиняющий срок работы бура [8, 9].

Применение для изоляции нейлона, полиэтилена, эскапона и других особо стойких к действию электрогидравлических ударов материалов делает работу бура вполне надежной. Фокусирующий отражатель и передний конец изоляции центрального электрода выполняются именно из этих материалов. Поскольку в буре данной конструкции только эти два элемента могут подвергнуться разрушению, они выполняются сменными. Буры этого типа не имеют никаких движущихся частей, способны образовывать не только круглые, но и любой формы скважины. Подача воды в забой осуществляется не только через отверстия, расположенные вне изоляции центрального электрода, но и через полость центрального электрода, который в этом случае имеет трубчатую форму.

Для образования кольцевой прорези — кольцевого забоя с центральным керном по методу «грязного забоя» — был предложен бур, имеющий минимум два неподвижных, коаксиальных друг другу трубчатых электрода, которые могут быть различной формы (рис. 5.7), но при этом должны иметь плавное закругление всех острых углов. Поскольку расстояние между электродами, заданное шириной прорези, в этом случае обычно не превышает 30—50 мм, то для работы буров этой конструкции не требуется напряжений больше 100 кВ. В конструкциях этих буров также может быть предусмотрена возможность работы в режиме обратной полярности [9].

Вода в этом буре подается как через полость центрального электрода, так и через каналы в изоляторе. Высота каждого из коаксиальных цилиндров-электродов может быть различной: один из электродов может быть только узким кольцом. Отверстия для выхода воды могут быть сделаны не только внизу, на коронке, но и вверху (для тех случаев, когда шлама много и на его подъем необходимо затрачивать большее количество воды, чтобы не «перезагрязнить» забой). Скорость бурения таким буром, как и буром сплошного забоя, является линейной функцией потребляемой мощности, определяющей частоту разрядов на данном режиме бурения. Буры кольцевого забоя целесообразно использовать для проходки полного профиля шахт, штолен, штреков, тоннелей.

Питание обоих типов буров «грязного забоя» рационально осуществлять от погружаемых непосредственно в забой силовых установок питания. В ряде случаев погружаться может только разрядная часть контура, зарядная часть может быть и наземной.

Линейные буры. Если, образно говоря, «сплющить» бур сплошного или кольцевого забоя с неподвижным центральным электродом, то конструктивно получатся два типа линейных буров. Линейные буры с подачей воды через центральный электрод при длине резания, равной 1—2 м, могут образовывать при напряжении

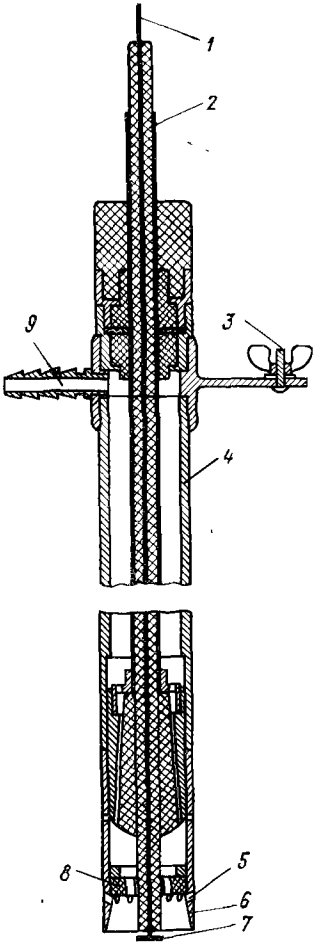


Рис. 5.6. Электрогидравлический бур сплошного забоя с неподвижным центральным электродом:

1 — положительный центральный электрод; *2* — отрицательный электрод — оплетка кабеля; *3* — клемма подсоединения заземления, *4* — буровая труба; *5* — шламовыводные отверстия; *6* — край коронки полюс разряда; *7* — тарельчатая головка центрального электрода; *8* — отражатель; *9* — подвод воды

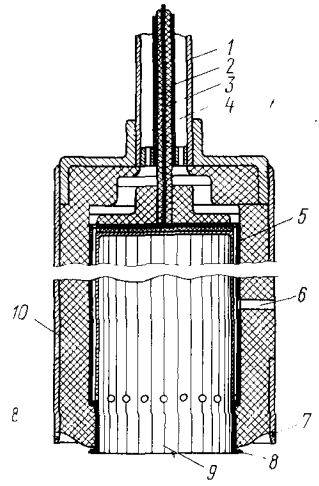


Рис. 5.7. Электрогидравлический бур кольцевого забоя с неподвижным центральным электродом:

1 буровая труба полюс токопровода; *2* — внешний электрод — оплетка кабеля; *3* — центральный электрод жила кабеля; *4* полость для прохода воды; *5* внутренняя труба буровой коронки (токопровод); *6* — отверстия для прохода воды, *7* — газо и шламовыводные отверстия; *8* разрядные острия; *9* — полость для прохода керна; *10* — корпус буровой коронки — токоподвод

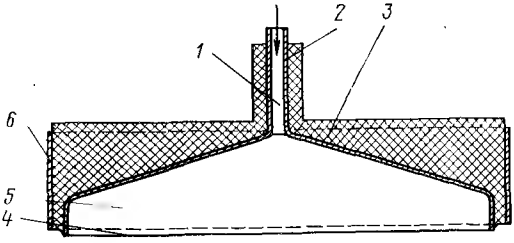


Рис. 5.8. Электрогидравлический линейный бур с трубчатым электродом:

1 канал для подачи воды; *2* — центральный положительный электрод, *3* диэлектрик, *4* нижний конец центрального электрода; *5* внутренняя полость центрального электрода, *6* отрицательный электрод

50—80 кВ узкие прорези-щели шириной до 8—10 мм не только по прямым, но и по любым кривым линиям. В бурах первого типа центральный электрод выполнен в виде пластинки, а вода подается через отверстия в теле диэлектрика, а в бурах второго типа — в виде плоской трубки, через полость которой подается вода (рис. 5.8). В этом случае центральный электрод окружен трубчатым кольцевым электродом. Электроды отделены друг от друга диэлектриком, устойчивым к действию электрогидравлических ударов. Между нижними концами электродов возникают разряды, обегающие весь периметр торца коронки. Внутренняя полость центрального электрода через канал непрерывно наполняется водой, поступающей под некоторым давлением через патрубок. Количество воды в забое определяется условиями метода автоматического распределения разрядов (см. гл. 2.4). Объединяя линейные буры в группы, представляется возможным прорезать пазы и вырезать отверстия различной конфигурации, а комбинируя работу линейных буров с работой буров кольцевого забоя,— разрезать образующийся центральный керн на блоки, удобные для транспортирования.

Бурами этого типа можно бурить все горные породы, мерзлый грунт, лед, соль (при усиленной промывке водой), резать древесину, выполнять различные подводные работы прорезать температурные швы в бетоне, каналы-щели для шпунта в основании плотин, а также бурить скважины с любой продольной кривизной, что достигается приданием соответствующей продольной кривизны стержню бура.

Прочие виды буров. Простейшим вариантом многоэлектродного бура является двухэлектродный бур-долото [7]. Для исследования разрушения неметаллических материалов электрогидравлическим способом было изготовлено устройство, названное электрогидравлическим долотом. Оно состоит из текстолитового наконечника с выходящими из него электродами из стальной проволоки. Наконечник насаживался на текстолитовый стержень, свободно двигающийся во втулке, закрепленной на перекладине ванны. Для уменьшения подбрасывания долота после каждого удара на текстолитовый стержень помещался груз. Таким долотом успешно долбились различные материалы со скоростью от 3 до 30 мм/мин при частоте 50—60 импульсов в минуту и потребляемой мощности установки 100 200 Вт. Опытным путем было установлено, что породы с проводящими или полупроводящими включениями долбятся с увеличенной скоростью, мелкокристаллические породы и вещества типа твердых растворов долбятся легче крупнокристаллических, волокнистых и некоторых слоистых пород. Таким образом, для разрушения горных пород определяющее значение имеет не твердость породы, а ее хрупкость. Увеличивая число электродов и различным образом располагая их, можно получить несколько типов многоэлектродных буров. Расположение электродов долот может быть линейным (по периферии

окружности в один, два и более рядов колец) либо уступчатым (например, в шахматном порядке).

Соединяя в одном агрегате два, три и более кольцевых бура с неподвижным центральным электродом, можно образовать различные варианты многоэлектродных буров. Эти буры позволяют получать при напряжении до 100 кВ любые диаметры скважин.

Вводя между двумя основными – питающими — электродами близкорасположенные изолированные дополнительные электроды, можно получить направленное бурение «пиление» породы. Такие буры представляют собой новый конструктивный класс — пилоэлектродные буры, которые могут быть как линейными, так и кольцевыми.

Если в пилоэлектродном буре заменить многочисленные неподвижные дополнительные электроды насыпанной в забой мелкой металлической дробью, то дробинки начнут играть роль отдельных дополнительных электродов, образуя новый класс — дробноэлектродные буры. Эти буры прорезают в породе резко очерченную, самоцентрующуюся прямолинейную прорезь, следовательно, на их основе можно создать многогранные буры [7, 8].

Давления, возникающие при электрогидравлических ударах, могут не только рыхлить породу, удаляемую затем водой, но при бурении слабых горных пород и плотных грунтов настолько уплотнять стенки скважины, что удаление разбуренной породы или грунта становится необязательным. Эти же давления будут закреплять и стенки скважины. Для производства буровых работ в таких грунтах предложен электрогидравлический бур, выполненный в виде торпеды (рис. 5.9), который подвешивают на кабель-тросе. Внутрь бура подают вяжущий раствор. Под действием электрогидравлических ударов порода в забое рыхлится, раздвигается к стенкам скважины и уплотняется. При проходке скважины раствор смешивается с грунтом в грунтобетонную или грунтоцементную смесь. По достижении буром водоносного горизонта при бурении артезианских скважин или заданной глубины проходки при бурении горизонтальных скважин в слабых горных породах подачу тока прекращают и бур поднимают за кабель-трос наружу.

При протаскивании бура-торпеды в обратном направлении внешней поверхностью бура выглаживается и уплотняется смесь грунта с вяжущим раствором. Этим создается прочная облицовка стенок скважины. Электрогидравлический бур такого типа может быть использован в горном деле, мелиорации, водоснабжении и канализации.

В тех случаях, когда при электрогидравлическом бурении грунт позволит осуществлять одновременно с бурением и уплотнение стенок скважин, в креплении их толстыми стальными обсадными трубами нет необходимости, можно ограничиться креплением стенок скважин металлической лентой [88]. Для этого металлическую ленту, предварительно уложенную

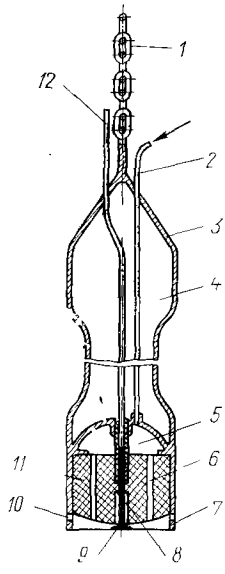


Рис. 5.9. Электрогидравлический бур «торпеда»:
1 — кабель-трос; *2* — трубопровод; *3* — корпус бура; *4* — полость бура; *5* — полость, в которую подается вяжущий раствор; *6* — сквозные отверстия втулки, *7* — нижняя часть коронки бура, *8* — зазор; *9* — тарельчатый конец положительного электрода; *10* — отверстие для выхода смеси, разрушаемой породы и раствора; *11* — диэлектрическая втулка; *12* — водопровод

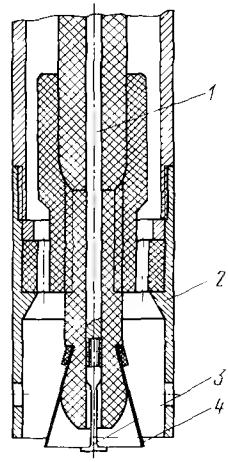


Рис. 5.10. Электродный узел для буровых электрогидравлических устройств:
1 — центральный электрод; *2* — трубчатый электрод; *3* — тарельчатый конец центрального электрода, *4* — конусообразный экран

в рулон, опускают на забой скважины. Наружный конец ленты отгибают от рулона под прямым углом и закрепляют на забое вдавливанием в грунт (или каким-либо другим способом). Затем внутренний конец ленты рулона вращают в направлении, противоположном навивке ленты, с одновременным осевым перемещением его от забоя. При этом происходит вытягивание рулона в длину и расширение витков рулона до стенок скважины. Таким образом, металлическая лента укладывается по спирали в трубу, а для того чтобы труба не допускала дренирования воды, близлежащие слои ленты располагают внахлест. Наружный конец ленты закрепляют так же, как и внутренний. Такая технология упрощает крепление скважины шахт, штреков, штолен и других сооружений.

Электродные узлы буровых установок. Электродные узлы буровых установок состоят из заключенного в изоляционную трубку центрального электрода и коаксиального ему второго электрода, роль которого может выполнять коронка бура. Центральный электрод выполнен в виде неподвижного стержня, вращающегося стержня или полого цилиндра. Наиболее рациональным и обеспечивающим высокую производительность работы бура будет электродный узел, изображенный на рис. 5.10. Отличительной чертой этого электродного узла, предназначенного для бурения методом «грязного забоя», является установленный на нижнем конце изоляционной трубки эластичный изоляционный конусообразный экран, нижнее основание которого расположено на уровне торца центрального электрода, а диаметр основания не превышает внутреннего диаметра второго, коаксиального электрода. При этом

продукты бурения в значительном количестве накапливаются под экраном, поскольку экран препятствует прохождению рабочей (промывочной) жидкости на этом участке. В результате область, расположенная над разбуриваемой поверхностью и защищенная экраном, становится значительно более загрязненной продуктами бурения, чем область, непосредственно прилегающая к поверхности бурения. Это не позволяет разрядам уходить вверх, т. е. удаляться от разбуриваемой поверхности, чем обеспечивается сохранение оптимального пути развития разрядов, в соответствии с которым эффективность воздействия электрогидравлических ударов на разрушаемый материал (горную породу) будет максимально возможной.

Электрогидравлические режущие устройства. Электрогидравлический резак для горных пород [7, 8, 30] и других нетокопроводящих материалов представляет собой разрядный искровой промежуток, ограниченный электродами, которые могут перемещаться по заданной линии разряда в непосредственной близости от поверхности разрезаемого материала. Усиление направленности действия электрогидравлических ударов достигается при помощи кумулятивных отражающих поверхностей. Получение реза нужной длины при продольной резке обеспечивается применением направляющих устройств, а при круговой резке вращающихся устройств.

Обеспечение постоянного соприкосновения электродов резака с поверхностью материала достигается применением обычных средств, например пружины.

5.3. Электрогидравлические устройства для погружения свай

Забивка или погружение свай может осуществляться электрогидравлическими ударами, возникающими как над сваями, так и под ними на специальном рабочем наконечнике или при использовании арматуры в качестве электродов [3, 7]. Один из предложенных вариантов устройства (рис. 5.11) состоит из корпуса разрядной головки, в котором закреплены изолированный центральный положительный электрод и отрицательный электрод с каналом для подачи воды в зону разряда. При этом разрядный промежуток выступает за нижний торец сваи, а трубчатый корпус устройства снабжен механизмом для крепления в свае. При осуществлении разрядов в разрядной головке устройства грунт под действием электрогидравлических ударов раздвигается в стороны и свая под действием собственного веса опускается в образовавшуюся полость. Ударные волны, возникающие при электрогидравлических ударах, быстро затухают в грунте, и сотрясения практически отсутствуют уже на расстоянии 3 м от забиваемой сваи. После погружения сваи раздвинутый грунт обжимает сваю, обеспечивая ей тем самым заданную несущую способность и предотвращая возможность деформаций.

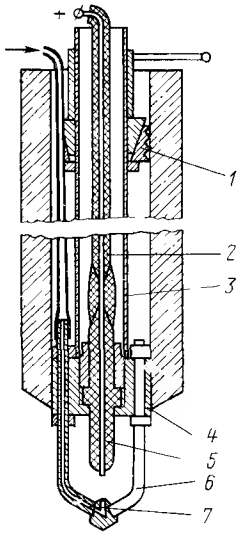


Рис. 5.11. Электрогидравлическое устройство для погружения полых свай: *1* — механизм крепления устройства в свае; *2* — высоковольтный кабель; *3* — трубчатый корпус устройства; *4* — корпус разрядной головки; *5* — положительный электрод; *6* — отрицательный электрод; *7* — канал для подачи воды в зону разряда

Аналогичным устройством может быть осуществлено и создание железобетонной сваи непосредственно в грунте. Для этого погружаемое устройство помещается в арматурную коробку, которую фиксируют и закрепляют над разрядной головкой. Возникающие между электродами электрогидравлические удары раздвигают грунт и устройство вместе с арматурой и подаваемым бетонным раствором погружается, образуя железобетонную сваю, после чего оно извлекается из грунта. В процессе образования сваи бетонный раствор непрерывно подвергается вибрирующему действию электрогидравлических ударов и интенсивно уплотняется, что делает ее весьма прочной. Стенки таких свай имеют неровную поверхность. Это способствует увеличению их сцепляемости с грунтом, а значит, и повышению несущей способности сваи.

5.4. Электрогидравлические устройства для дробления различных материалов

Электрогидравлическое дробление является новым способом измельчения различных материалов, позволяет получать заданную степень измельчения при определенном гранулометрическом составе продукта и обладает высокой избирательностью дробления [4, 5, 7].

Электрогидравлические устройства для дробления в отличие от механических дробилок не имеют движущихся частей, изготовляются из обычной конструкционной стали, а их корпус практически не изнашивается при работе. При работе эти устройства не образуют пыли, занимают сравнительно небольшие производственные площади и допускают совмещение в них процессов дробления, смешения и флотации материалов. Рабочей средой в электрогидравлических дробилках может служить любая жидкость (в основном техническая вода).

Технологический процесс электрогидравлического дробления легко поддается автоматизации, для обслуживания электрогидравлических дробилок не требуется большого числа высококвалифицированных рабочих. В электрогидравлических дробилках можно дробить и измельчать практически любые материалы: горные породы, уголь, асбест, слюду, бумагу, цемент, зерно, торф, грубые корма, хрупкие металлы, разрушать микроорганизмы, выделять алмазы из кимберлитов, обрабатывать почву и произ-

водить другие работы. Дробилки получают все более широкое распространение во всех областях народного хозяйства.

При конструировании и эксплуатации электрогидравлических дробилок следует руководствоваться факторами, влияющими на КПД процесса дробления материалов, методами и приемами электрогидравлической обработки, изложенными в гл. 1—3. Так, при определении размеров поверхностей электродов следует использовать метод получения сверхдлинных разрядов в ионопроводящих жидкостях и руководствоваться методом управления потерями. Для усиления направленного действия электрогидравлических ударов на материал применять отражатели.

При эксплуатации электрогидравлических дробилок в целях вывода электрогидравлического устройства на оптимальный режим работы необходимо использовать метод «грязного забоя», а для увеличения зоны эффективного дробления метод автоматического распределения разрядов [4, 5], при конструировании и эксплуатации дробилок – резонансный метод разрушения материалов [42].

Из особенностей процессов электрогидравлического дробления следует, что КПД самой дробилки будет тем выше, чем более мелкие фракции материала предназначена она выдавать и чем мельче размеры фракций исходного материала. Это объясняется тем, что искра отдает энергию своей поверхностью, а следовательно, чем плотнее материал окружает зону разряда (чем он более измельчен), тем рациональнее и полнее расходуется выделяемая каналом разряда энергия. В связи с этим электрогидравлический метод дробления на крупные фракции оказывается менее выгодным по сравнению с существующими методами дробления и, наоборот, с увеличением степени измельчения электрогидравлическое дробление становится наиболее выгодным методом.

Отсюда также следует, что при малой длине искры невозможно обеспечить быстрое и надежное контактирование с большими по размерам кусками материала.

Таким образом, длина искры в любой дробилке должна быть приведена в соотношение с размерами загружаемых в нее кусков материала. Опыт показал, что для дробилок большого диаметра длина искры не должна быть меньше $^1/_3$ диаметра наибольших по размерам кусков загружаемого материала. Для дробилок небольшого диаметра (с относительно малой возможной длиной искры) длина искры может быть больше этой нормы.

В силу ряда особенностей протекания электрогидравлического разряда в жидкости практические оптимальные режимы дробления материалов [4] в электрогидравлических дробилках с наибольшим значением механического КПД наступают при данной длине искры (l — const) в любой емкости C при соотношении

$$U_{opt} = kU_{min},$$

где U_{opt} — напряжение при оптимальном режиме, кВ; U_{min} — мини-

мальное пробивное напряжение, кВ; k — эмпирический коэффициент, $k = 1{,}2 \div 1{,}3$.

Кроме того, значение механического КПД будет тем выше, чем меньше индуктивность разрядного контура, ближе к нейтральному параметр pH технической воды, выше напряжение, длиннее искра и меньше длительность искрового разряда. Все эти параметры следует приближать к максимальным значениям, которые можно получить на практике.

Различные типы электрогидравлических дробилок классифицируются прежде всего в зависимости от типа материала, подвергаемого электрогидравлической обработке. Каждому типу материала соответствует и свой метод дробления:

1) дробилки для твердых непроводящих материалов (камня, цемента, фарфора); дробление производится методом «внутреннего удара» [25];

2) дробилки для твердых хрупких проводящих материалов (твердых сплавов, карбидов); дробление производится методами «совместного дробления» и «внешнего удара» [47, 48];

3) дробилки для упругих, волокнистых и эластичных материалов (бумаги, резины, древесины, торфа и других органических материалов); дробление наиболее целесообразно производить методами «воздушной кавитации» и «пузырьковой кумуляции» [43, 53].

Разработаны также способы и устройства для дробления металлургических шлаков и кимберлитов, коллоидного измельчения металлов и их соединений, коллоидного обогащения руд и бесшахтной добычи полезных ископаемых [4, 5, 8, 9]. Все типы дробилок различаются также по степени измельчения материалов до фракций определенного размера (щебеночные, песчаные, коллоидные) и конструктивно — в зависимости от расположения положительного электрода, которое может быть верхним, боковым или нижним. Отрицательным электродом почти всегда является корпус дробилки. Загрузка материала также может быть верхней, нижней и боковой.

Все электрогидравлические дробилки могут работать и как смесители, а некоторые из них кроме дробления могут осуществлять и процесс флотации.

Дробильные агрегаты конструктивно могут быть выполнены и совмещенными. В этом случае они заключаются в один общий корпус с несколькими электродами и общим загрузочным устройством.

Электрогидравлические дробилки для твердых нетокопроводящих материалов. Наибольшее распространение получили дробилки, использующие метод электрогидравлического дробления «внутренним ударом». Сущность метода заключается в том, что дробление производится внутри объема жидкости, заполненного обрабатываемым материалом, под действием электрогидравлических ударов [4, 5].

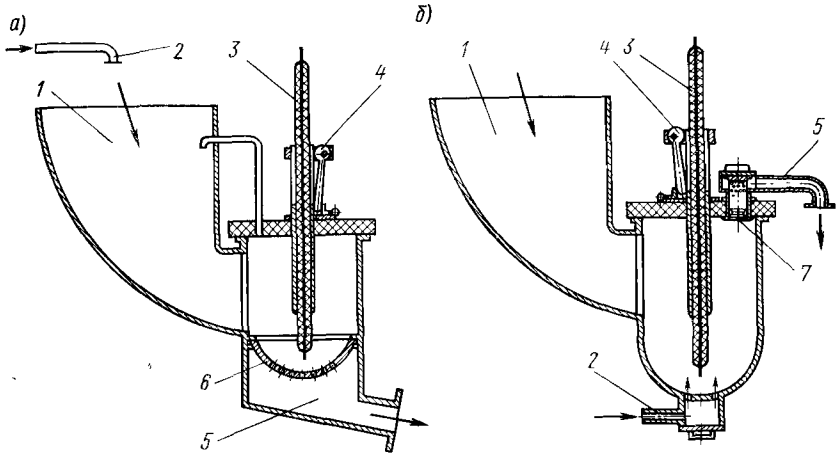


Рис. 5.12. Электрогидравлические дробилки для дробления твердых материалов на крупные (*а*) и мелкие фракции (*б*);
1 — загрузочный бункер, *2* — подача воды; *3* — положительный электрод, *4* — зажим для регулировки длины рабочего искрового промежутка; *5* — выход готового продукта; *6* — днище дробилки (отрицательный электрод); *7* — фильтр

Электрогидравлические дробилки для этих целей [25] состоят из корпуса с установленными в нем одной или несколькими парами электродов. Корпус дробилки может быть различной формы (в виде многогранника или тела вращения). Одним из электродов, как правило, является корпус дробилки, а вторым — изолированный металлический стержень. Днище или стенка корпуса дробилки имеет калиброванные отверстия, а для тонкого дробления ее выходной патрубок снабжается фильтром с калиброванными отверстиями, диаметр которых соответствует верхнему пределу крупности частиц готового продукта.

На рис. 5.12, *а* изображена электрогидравлическая дробилка для крупного дробления (щебеночная). В загрузочный бункер непрерывно подают подлежащий обработке материал, а по трубопроводу — рабочую жидкость (воду) с таким расчетом, чтобы уровень воды в бункере был постоянным. Материал, заполняющий объем рабочей камеры, дробится под действием электрогидравлических ударов, возникающих в зоне разряда. Удаление обработанного материала из корпуса в выходной бункер осуществляется как действием самих электрогидравлических ударов, так и течением рабочей жидкости через отверстия днища.

Опыт показал, что наиболее рациональная максимальная крупность выдаваемого дробилкой материала не должна превышать 25—35 мм. Использование гидротранспорта в щебеночных дробилках для удаления раздробленного материала нерационально, так как вызывает большой расход воды, поэтому для этого применяют ковшовый элеватор. Сменой днищ с разными диамет-

рами выходных отверстий можно изменять среднюю крупность помола.

На рис. 5.12, *б* изображена электрогидравлическая дробилка для тонкого дробления – измельчения. Трубопровод подачи рабочей жидкости этой дробилки расположен под днищем корпуса, а в крышке корпуса установлен патрубок, снабженный фильтром для удаления готового продукта. Транспортирование готового продукта производится восходящим потоком рабочей жидкости.

Песчаные дробилки, например с нижним электродом (рис. 5.13), предназначены для дробления материалов на фракции не крупнее 1,0 8 мм. Крупность фракций задается, как и в щебеночных дробилках, диаметром выходных отверстий полусферического днища. Транспортирование раздробленного материала из корпуса дробилки может быть принудительным или гидравлическим. Такие дробилки при дроблении гранита (крепостью 11—12, по Протодьяконову) от кусков размерами 50 –100 мм до песка не крупнее 3 мм расходуют 6 7 кВт·ч энергии на 1 т раздробленного продукта [4, 9].

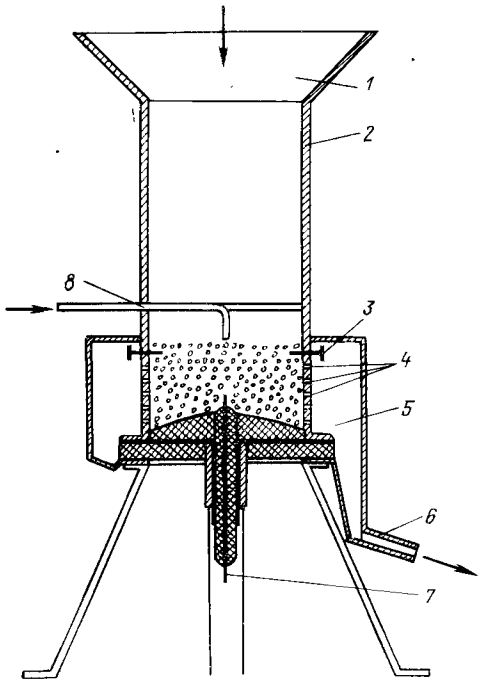


Рис. 5.13. Электрогидравлическая песчаная дробилка с нижним электродом:
1 – загрузочная воронка; *2* – корпус дробилки; *3* — фиксатор — локализатор разряда; *4* – отверстия в корпусе дробилки; *5* — приемный бункер, *6* лоток; *7* центральный электрод; *8* — подвод воды

Дробилки коллоидного типа могут измельчать материалы на фракции от 1 . 2 мм до долей микрона. Тонкость измельчения задается скоростью восходящего потока воды, регулируемого в самых широких пределах. В коллоидных дробилках с верхним электродом и верхней подачей материала (рис. 5.14, *а*) раздробленный материал водой выносится из зоны дробления, поднимается, и через отверстия в корпусе дробилки поступает в классификатор, где разделяется по крупности восходящим потоком жидкости. Далее конечный продукт обработки через отверстия классификатора поступает в бункер, откуда по верхнему лотку выдается наружу для использования или дальнейшей классификации (например, в се-

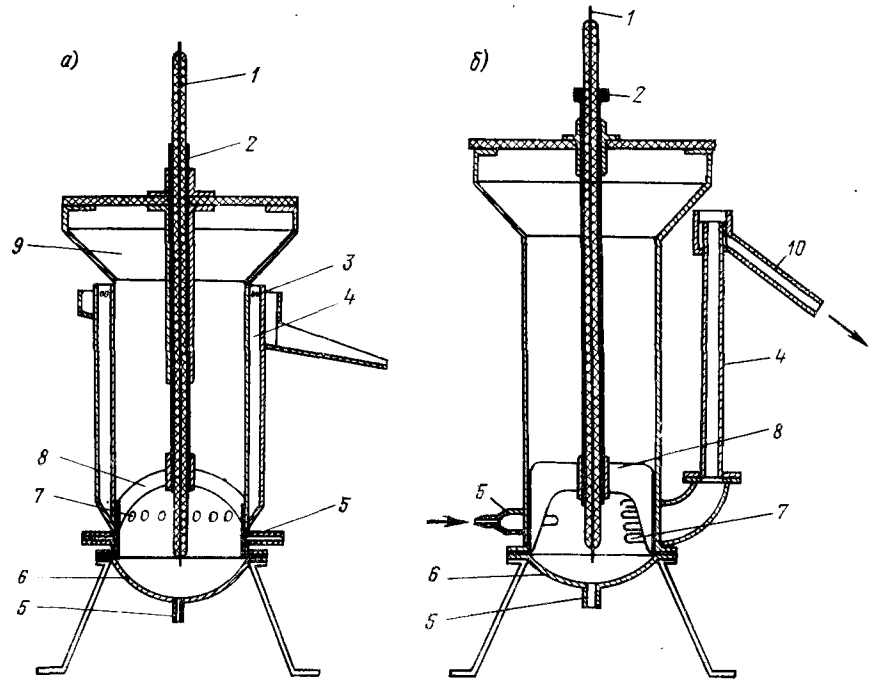


Рис. 5.14. Электрогидравлические коллоидные дробилки с верхним электродом: *а* — со стационарным классификатором; *б* — со сменным классификатором; *1* — коаксиальный центральный электрод, *2* — второй полюс тока; *3* — отверстия классификатора; *4* — классификатор, *5* — подвод воды, *6* — днище дробилки, *7* — отверстия в корпусе дробилки; *8* — токопроводы; *9* — загрузочная воронка; *10* — выход готового продукта

рии отстойников или фильтров). Коаксиальный центральный электрод укреплен вверху дробилки на планке из изоляционного материала. Второй полюс тока через токопроводы подается на днище дробилки [4].

Коллоидная дробилка (рис. 5.14, *б*) имеет верхний электрод, верхнюю загрузку и боковой выносной сменный классификатор, который допускает измельчение в очень большом диапазоне крупностей. Изменяя сечение трубы сменного классификатора, можно при небольшом расходе воды в очень широком диапазоне изменять скорость восходящего потока, а следовательно, и крупность измельчения. Этот вариант дробилок практически может выдавать при любой степени помола пульпу с очень малым содержанием воды, что в некоторых случаях имеет существенное значение. Материал, непрерывно загружаемый через воронку, измельчается в зоне дробления и через отверстия выносится водой в сменный классификатор. Через приемный бункер материал из сменного классификатора в виде пульпы по трубе выдается наружу [4].

Значительно улучшает работу дробилок фильтр-классификатор в виде решетки, установленный наклонно внутри корпуса дробилки. Над стыком нижнего края решетки с корпусом расположено сквозное отверстие, соединенное трубопроводом с загрузочным бункером, в которое вмонтирован эжектор. Это значительно повышает интенсивность циркуляции обрабатываемого материала внутри рабочего пространства зоны дробления и облегчает выгрузку готовых фракций материала. При этом частицы материала, имеющие заданную крупность, а также те частицы, крупность которых меньше заданной, под действием электрогидравлических ударов, вибрации и давления материала, находящегося в бункере, поднимаются вместе с восходящим потоком за пределы зоны дробления, проходят сквозь решетку и выносятся наружу. Те из них, которые крупнее заданных, по решетке скатываются вниз и затем по трубопроводу опять попадают в загрузочный бункер.

Дальнейшие исследования позволили повысить качество сверхтонкого помола и увеличить производительность электрогидравлических дробилок этого типа за счет использования предложенного метода дробления материалов «на воздух». Сущность метода заключается в том, что выход электрогидравлически обработанного материала из отверстий донышка дробилки производится не в жидкость, а в воздух или даже вакуум. При устранении сопротивления жидкости производительность дробилки увеличивается, а качество измельчаемого материала улучшается, так как снижается переизмельчение материала, имеющее место при некоторых видах электрогидравлического дробления.

Дробилки выборочного типа предназначены для выборочного дробления материалов, осуществляемого в процессе их гидротранспортирования. При гидротранспортировании (например, гравийной массы из карьера или грунта землесосом) в составе пульпы попадаются крупные камни (галька), представляющие опасность для работы насосов. Дробилка указанного типа, включенная в пульпопровод до насоса, предотвращает попадание в насос камней, которые могут вывести насос из строя. Эта же дробилка может гарантировать заданный верхний предел крупности материала, проходящего по пульпопроводу.

Один из вариантов дробилок этого типа (рис. 5.15, *а*) имеет верхний электрод и нижнюю подачу материала [4]. Пульпа, содержащая крупные куски камня, поступает вместе с водой снизу по трубопроводу, имеющему расширение — камеру, в нижней части которой за счет резкого перепада скорости зависает весь крупный каменный материал, подлежащий дроблению, в то время как остальной материал уносится потоком воды в трубопровод. Взвешенная крупная фракция непрерывно дробится «на весу» до тех пор, пока крупность полученных после дробления фракций не окажется лежащей в пределах нормы, задаваемой скоростью восходящего потока. Такие фракции немедленно уносятся водой по трубопроводу к месту назначения. Верхний

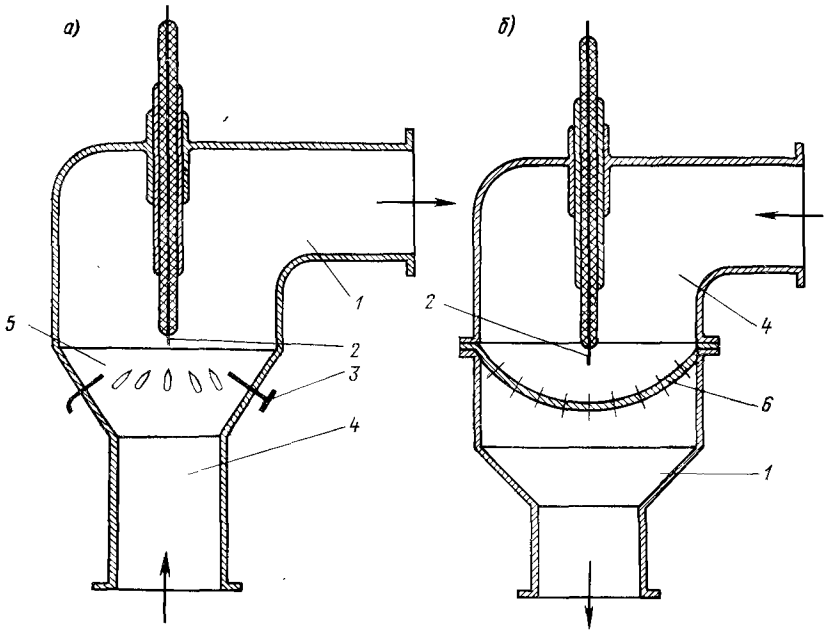


Рис. 5.15. Электрогидравлические выборочные дробилки : *а* — с нижней подачей материала; *б* — с верхней подачей материала;
1 выходная часть дробилки, *2* центральный электрод; *3* — фиксаторы; *4* — входная часть дробилки; *5* расширенная часть трубопровода; *6* — решетчатое днище дробилки

электрод образует с фиксаторами рабочий искровой промежуток. Корпус дробилки заземлен и является вторым — отрицательным — электродом.

На рис. 5.15, *б* изображена выборочная дробилка с верхним электродом и верхней подачей материала. Она предназначена для тех же целей, но предполагает более мелкое измельчение (на мелкий щебень или на крупный песок). Материал поступает в дробилку по трубопроводу и на сменном решетчатом днище дробится до заданной крупности фракций, проходя затем через отверстия в днище в трубопровод. Центральный электрод образует с днищем и корпусом дробилки искровой промежуток [4].

Для быстрого измельчения различных лабораторных проб массой от нескольких граммов до десятков килограммов были также предложены достаточно простые конструкции большой и малой лабораторных (порционных) дробилок. Они состоят из корпуса-стакана с крышкой и вставленным в нее регулируемым по длине положительным электродом (второй полюс тока подается на корпус дробилки) [4].

Режимы работы электрогидравлических дробилок устанавливаются в зависимости от вида материала, размера исходных

фракций и требований к готовой продукции. Согласно нашим представлениям о процессах, происходящих при электрогидравлическом дроблении, раскалывание материала на крупные куски осуществляется в основном ударной волной, квазигидростатическим давлением, возникающим в объеме жидкости при расширении канала разряда. При этом «запаздывающий» поток осуществляет интенсивное перемешивание и, как следствие, перетирание крупных кусков друг о друга, в результате чего появляется значительное количество мелких фракций.

Ультразвуковые колебания в жидкости, возникающие при электрогидравлическом эффекте, способны интенсивно измельчать частицы, диаметр которых сопоставим с длиной волны данной группы частот, поэтому тонкое дробление крупных кусков материала следует вести в электрогидравлических дробилках большого диаметра на мягких режимах ($U \leqslant 20$ кВ; $C \geqslant 1{,}0$ мкФ). Если исходный материал задан в виде мелких и очень мелких фракций, дробление следует вести в электрогидравлических дробилках малого диаметра на жестких режимах ($U \geqslant 50$ кВ; $C \leqslant 0{,}1$ мкФ). Если исходный материал состоит из самых различных по размеру фракций (как это обычно бывает на практике), электрогидравлическое дробление следует осуществлять непрерывно в следующей последовательности: сначала в электрогидравлических дробилках большого диаметра на мягких режимах, а затем в дробилках малого диаметра на жестких режимах. При этом дробилки должны быть связаны в единый технологический комплекс. При таком последовательном чередовании мягкого и жесткого режимов выход тонких фракций при тех же энергозатратах увеличивается до 30 %.

Важно также учитывать свойства и специфику обрабатываемого материала. Так, некоторые рыхлые, упругие материалы (мел, некоторые известняки, ломовые глины, мергели и т. п.) рациональнее всего измельчать на мягких режимах с большой длиной искры в основном за счет энергии запаздывающего потока в электрогидравлических дробилках большого диаметра с тем, чтобы измельчение осуществлялось в основном за счет интенсивного взаимного перетирания кусков материала при их соударениях друг с другом на всем протяжении радиуса действия электрогидравлических ударов в дробилке. Режим обработки в этом случае может быть, например, таким: $C = 0{,}3 \div 2{,}0$ мкФ; $U = 20 \div 50$ кВ; $l > 80$ мм. Наоборот, некоторые твердые, но хрупкие материалы (кварц, стекло, алмазы и т. п.) или очень вязкие материалы (диабаз, мрамор и т. п.) следует измельчать в дробилках малого диаметра с локализованной вокруг разряда небольшой рабочей камерой на очень жестких режимах с относительно небольшой длиной искры в основном за счет бризантного действия энергии ударной волны. Режим обработки при этом может быть следующий: $C = 0{,}005 \div 0{,}1$ мкФ; $U = 50 \div 80$ кВ; $l \leqslant 50$ мм.

В тех случаях, когда даже незначительное загрязнение конечного продукта металлом дробилки будет нежелательным, электро-

гидравлическое измельчение независимо от режима и характера материала следует вести в дробилках большого диаметра, поскольку в этом случае вся энергия электрогидравлических ударов будет расходоваться внутри дробилки, практически «не доходя» до ее стенок, роль «футеровки» которых станет выполнять сам материал.

Электрогидравлическому измельчению могут подвергаться материалы, ранее уже измельченные обычными способами до соответствующих пределов. Так, электрогидравлическому измельчению была подвергнута выпускаемая промышленностью (т. е. уже измельченная) «белая сажа» - наполнитель для резиновой промышленности. Оказалось, что резина, изготовленная на такой «саже», на 25 % повысила все ранее полученные показатели прочности при практически небольших затратах на осуществление «домола». Весьма перспективным подобный домол оказался и для разного рода красителей.

Электрогидравлические дробилки для хрупких токопроводящих материалов. Дробление хрупких проводящих материалов осуществить методом «внутреннего удара» практически невозможно, так как эти материалы, окружая со всех сторон рабочий искровой промежуток дробилки, закорачивают его таким образом, что разряда не возникает (ток идет через металл), а следовательно, не возникает и электрогидравлического эффекта. Однако опыт показал, что если к какому-либо вязкому с большим внутренним трением и не проводящему ток материалу (например, диабазу) добавить (до 20 % от массы исходного материала) подлежащий дроблению хрупкий проводящий материал (например, карбид вольфрама) и такую смесь подвергать электрогидравлическому дроблению до крупности щебня или песка на обычных электрогидравлических дробилках, то короткого замыкания можно избежать и успешно осуществить совместное дробление этих материалов [47]. При этом измельчается либо один металл (в случае добавки его к пластмассе), либо оба компонента, затем легко разделяющиеся вследствие большой разницы их плотностей.

Процесс дробления при осуществлении этого метода, вероятно, происходит в основном за счет взаимных столкновений частиц непроводящего материала с частицами проводящего материала под действием электрогидравлических ударов, возникающих от разрядов в промежутках между проводящими частицами. При этом если основной электрогидравлический удар дробит прежде всего расположенные вдали от канала разряда внешние частицы проводящего материала, то кавитационный электрогидравлический удар дробит внутренние частицы, через которые ранее проходил канал разряда (рис. 5.16, *а* — *в*).

Стримеры, растущие от положительного электрода, дорастают до отрицательного электрода и образуют искровой канал разряда (рис. 5.16, *а*). При этом стримеры проходят через несколько частиц проводящего материала. Основная масса материала окру-

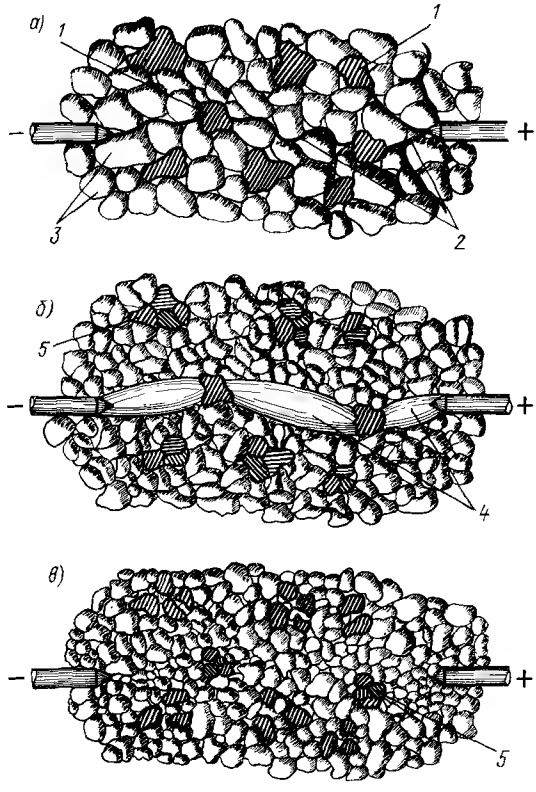


Рис. 5.16. Схема развития процесса при совместном дроблении: *а—в* последовательные стадии процесса;

1 проводящие частицы; *2* канал разряда и стримеры; *3* — непроводящие частицы; *4* — кавитационная полость; *5* — разрушенные проводящие частицы

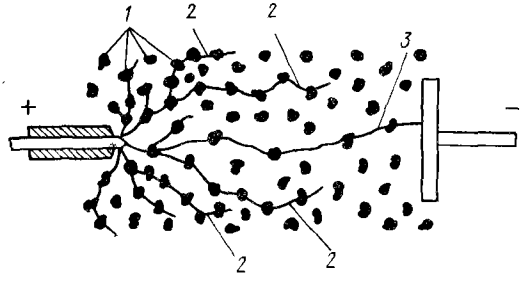


Рис. 5.17. Схема развития пробоя между проводящими частицами в жидкостн:

1 — проводящие частицы; *2* стримеры; *3* — каиал разряда

жает со всех сторон проводящие включения, как расположенные по линии канала разряда, так и находящиеся вдали от него. На следующей фазе процесса (рис. 5.16, *б*) между электродами вокруг канала разряда уже образовалась кавитационная полость, внутри которой находятся проводящие частицы, лежавшие ранее на пути канала. Основной гидравлический удар оставил целыми частицы, лежащие на пути канала разряда, но раздробил частицы, расположенные вне его. Одновременно раздробился и весь остальной материал. Следующая фаза процесса (рис. 5.16, *в*) отображает момент, когда кавитационная полость захлопнулась. При этом раздробились частицы, лежавшие ранее на пути канала разряда.

Рассматривая процессы, происходящие при осуществлении метода «совместного дробления», следует указать также и причину того, почему разряд, возникающий в объеме, содержащем сравнительно крупные частицы разрозненных проводящих включений, возникает не обязательно по кратчайшему, а по такому пути, на кото-

ром при всех прочих равных условиях находится наименьшее число проводящих частиц (рис. 5.17).

Это объясняется тем, что стример, растущий в жидкости от положительного электрода (как поток электронов, двигающийся к отрицательному электроду), дорастая до ближайшей проводящей частицы, включает в систему положительного электрода и всю поверхность этой частицы, увеличивая тем самым активную поверхность положительного электрода на величину площади поверхности «подсоединенной» частицы. Дорастание стримера до других частиц вместе с каждой из них будет увеличивать эту поверхность до тех пор, пока суммарная активная поверхность в системе положительного электрода в соответствии с принципом получения сверхдлинных разрядов не станет настолько большой, что дальнейший рост стримеров при заданном напряжении станет невозможным. Для дальнейшего прорастания стримеров необходимо повысить напряжение, а это приведет к увеличению расхода энергии. В связи с этим был разработан и другой способ дробления таких материалов, основанный на методе «внешнего удара» [5, 48].

Сущность метода «внешнего удара» сводится к тому, что электрогидравлический удар осуществляется в жидкости, но не внутри объема, заполненного проводящим материалом, а вне его и на таком расстоянии от материала, чтобы искровой разряд, имея достаточную длину для полного использования энергии данного импульса, был расположен возможно ближе к поверхности слоя разрушаемого материала. С этой целью применяют дробилки двух типов. В обоих типах дробилок разрушаемый хрупкий проводящий материал тонким слоем располагают на решетчатом днище дробилки.

Дробилка с параллельным разрядом (рис. 5.18, *а*) предназначена для дробления хрупких проводящих материалов [49] до любой крупности — от 20 мм и мельче. Крупность помола в ней, как и в обычных электрогидравлических дробилках, задается диаметром выходных отверстий днища. Транспортирование раздробленного материала из бункера дробилки может быть как гидравлическим, так и принудительным (с помощью транспортера). Конструктивно такие дробилки выполняются аналогично щебневым и песчаным. Дробилка имеет два верхних, изолированных от корпуса электрода, расположенных параллельно слою обрабатываемого материала, и боковую подачу материала. Удаление материала осуществляется гидротранспортом. Отрицательный электрод дробилки соединен электрически с корпусом дробилки и заземлен. Непрерывно загружаемый в приемную воронку материал поступает (в виде слоя) на днище, имеющее сетку калиброванных отверстий, определяющих верхний предел крупности дробления. Электрогидравлические удары фокусируются на материал отражателем из эластичного диэлектрика, расположенным на нижней части крышки корпуса. Раздробленный

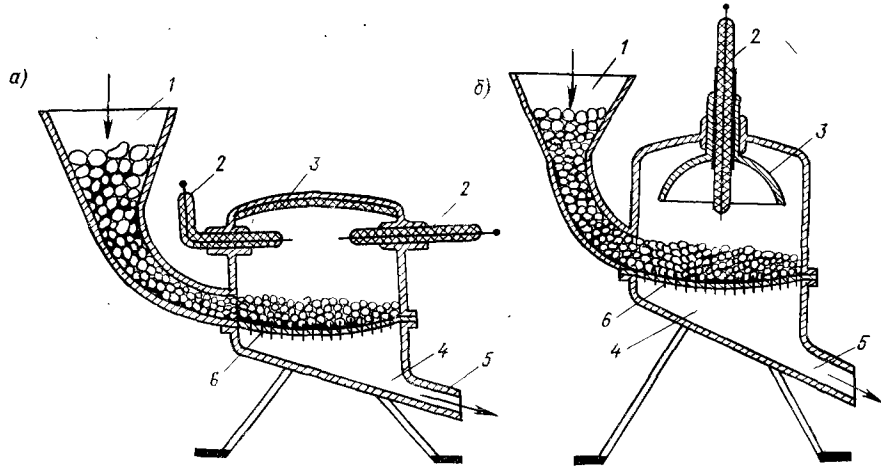


Рис. 5.18. Электрогидравлические дробилки для хрупких проводящих материалов: *а* — с параллельным разрядом; *б* — с перпендикулярным разрядом; *1* — загрузочная воронка; *2* — электроды; *3* — отражатель; *4* — приемный бункер; *5* — выводной канал; *6* — решетчатое дно дробилки

материал поступает в бункер, откуда по каналу выносится наружу водой, непрерывно подаваемой в дробилку. При работе вода должна заполнять весь корпус дробилки. Искровой разряд в ней необходимо располагать выше слоя материала на минимальном расстоянии, несколько большем половины длины искры при обоих изолированных электродах и несколько большем длины искры при заземленном отрицательном электроде.

Дробилка с перпендикулярным разрядом (рис. 5.18, *б*) предназначается для тех же целей, имеет аналогичную конструкцию (за исключением того, что в ней в качестве отрицательного электрода использован слой проводящего материала, лежащий на металлическом днище). Материал загружается в приемную воронку и попадает на днище дробилки, имеющее сетку калиброванных отверстий, где и располагается в виде слоя. Верхний положительный изолированный электрод образует между слоем материала и передним концом рабочий искровой промежуток. Для усиления действия и локализации направленности электрогидравлических ударов используют фокусирующий отражатель, установленный на корпусе дробилки и регулируемый по высоте.

Раздробленный материал проваливается через сетку отверстий днища в бункер, откуда по каналу выдается наружу.

Конструктивно дробилка может быть выполнена и с несколькими электродами, размещенными в одном удлиненном корпусе с общим удлиненным загрузочным каналом и приемным бункером.

Электрогидравлические устройства для дробления металлургических шлаков. Задача дробления металлургических шлаков представляет значительный интерес.

Шлаки являются сложным конгломератом сплавленных между собой частиц различного состава, резко отличающихся по механической прочности, в котором зачастую в большом количестве встречаются включения «корольков» (мелких слитков металла). Шлаки могут поступать на дробление холодными, горячими или даже жидкотекучими и отдавать водной среде различные растворимые соединения, делающие воду более проводящей.

Электрогидравлическое дробление холодных шлаковых масс, не содержащих слитков металла, превышающих по крупности верхний предел задаваемой крупности дробления, не встречает особых трудностей. Дробление таких шлаков может вестись в обычных электрогидравлических дробилках вплоть до сверхтонкого измельчения. По мере дробления шлака куски-слитки содержащегося в нем металла (железа, чугуна, меди, алюминия и т. п.), не поддающегося электрогидравлическому дроблению, будут накапливаться на днище дробилки до тех пор, пока это не вызовет короткого замыкания электродов и тогда процесс дробления прекратится.

Для восстановления процесса дробления и поддержания его непрерывности необходимо периодически (или постоянно) сбрасывать накапливающиеся на днище дробилки слитки металла, (например постепенным опусканием днища дробилки) в специальный приемник, откуда слитки удаляются обычным способом.

Ввиду того что процесс дробления осуществляется в непрерывно заменяемой водной среде, заполняющей весь корпус дробилки, а при необходимости и ее приемный бункер, то в увеличенный по размерам и заполненный водой бункер дробилки может поступать не только горячий, но даже и доведенный до жидкого состояния шлак. Затем шлак будет быстро охлаждаться, интенсивно растрескиваться, образуя гранулы, и поступать далее на дробление уже холодным и хрупким. Отдаваемые шлаком и переходящие в раствор соли и соединения, делающие воду проводящей, быстро разбавляются до безопасных для процесса дробления концентраций и уносятся поступающей водой из зоны дробления.

Для разрушения диэлектрических хрупких составляющих шлака при его дроблении может быть использован способ, при котором электрогидравлические удары возникают не внутри породы шлака, а вне ее, тем самым исключается возможность возникновения короткого замыкания. Это достигается осуществлением электрогидравлических ударов либо над слоем шлака, либо под ним, либо посередине, между слоями. При этом разряд может возникать между двумя (или несколькими) самостоятельными парами электродов или между одним (или несколькими) электродом и шлаком (с проводящими включениями), покрывающим второй электрод [5].

При анализе процессов, возникающих при электрогидравлическом дроблении металлургических шлаков, была найдена еще одна возможность применения электрогидравлического эффекта

для специального выделения металла из шлаков или из руд, содержащих самородные металлы. Оказалось возможным включить электрогидравлическое дробление металлургических шлаков как технологический элемент в металлургический процесс в целях непрерывной переработки и удаления шлака непосредственно от домен, мартенов, металлургических печей с последующим гидротранспортированием его в отвал или на дальнейшую переработку.

Металлургические шлаки, переработанные в продукт сверхтонкого измельчения, сразу же после их выхода из металлургического процесса, дают достаточно качественный цемент, а удаленный из них металл может быть тут же использован по своему назначению. Кроме того, применение этого способа устранит и необходимость в отвалах.

Кроме того, в процессе электрогидравлического дробления в воду из шлаков будут переходить многие химические элементы в виде их растворимых соединений, представляющие ценность для технических целей или как удобрения в сельском хозяйстве.

Опыт показал, что из любого металлургического шлака цветной или черной металлургии без особых затрат и применения сложных устройств с расходом энергии 5—15 кВт·ч на 1 т перерабатываемого шлака может быть выделено до 95 % содержащегося в нем металла. «Корольки» и мельчайшие чешуйки металла получаются при этом совершенно чистыми, без следов частиц шлаковых включений. Этот способ может быть применен и ко всем рудам, содержащим чистый — самородный — металл в виде вкраплений. Выделение металла может быть организовано как при прерывном, так и при непрерывном процессе.

Устройство для осуществления прерывного процесса может быть изготовлено по типу обычной бетономешалки, в которую вводится один центральный неподвижный электрод таким образом, чтобы его отогнутый конец образовал с корпусом бетономешалки и слоем шлака рабочий искровой промежуток. Непрерывно поступающая в корпус вода по мере дробления шлака вымывает и удаляет его, а медленное вращение корпуса бетономешалки постоянно подводит к зоне разрушения еще не раздробленные куски шлака. После того как в корпусе останется только один чистый металл, вращение корпуса прекращается, он наклоняется и выделенный металл ссыпается в приемник. Далее процесс повторяется в той же последовательности. Выделение самородных металлов из руд может вестись также и в коллоидных электрогидравлических дробилках [5].

Дальнейшие работы в этой области позволили предложить для этой цели электрогидравлическую установку (рис. 5.19). Выделение металла из шлака осуществляется здесь непрерывно, при этом энергия электрогидравлических ударов используется также и для перемещения обрабатываемого материала. Работа установки происходит следующим образом. В бункер загружают ис-

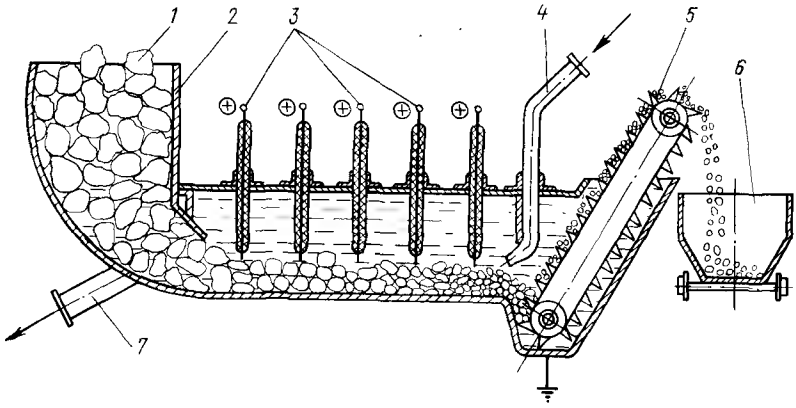


Рис. 5.19. Электрогидравлическое устройство для непрерывного выделения металла из шлаков:
1 загружаемый шлак; *2* — загрузочный бункер; *3* положительные электроды; *4* подача воды; *5* – элеватор для очищенного металла, *6* транспортная вагонетка; *7* выход воды со взвесью шлака

ходный материал шлак с «корольками» металла, а через входной патрубок установка заполняется рабочей жидкостью. Через коммутирующее устройство последовательно по заданной программе осуществляется подключение рабочих электродов к ГИТ. Тем самым создается «бегущая волна», перемещающая обрабатываемый материал к выходному патрубку.

Одновременно с перемещением под действием электрогидравлических ударов происходит непрерывное выделение металла из шлака, и к моменту подхода обрабатываемого материала к выходному патрубку установки происходит полное отделение металла от шлака.

Измельченный шлак вымывается через выходной патрубок водой или другой рабочей жидкостью, подаваемой противотоком через входной патрубок. Выделенный металл собирается в выводном бункере, откуда выгружается транспортером. Скорость перемещения обрабатываемого материала и, следовательно, продолжительность воздействия на него электрогидравлических ударов регулируются изменением угла наклона ванны относительно горизонта.

Дробление кимберлитов. Наиболее эффективной областью применения электрогидравлического дробления является дробление кимберлитов алмазоносных руд, содержащих ничтожную долю процента драгоценных алмазов относительно общей массы [5]. Алмаз — материал, легко выдерживающий огромное всестороннее сжатие, но довольно нестойкий, хрупкий к механическим ударам. Поэтому алмаз, не разрушаясь, легко противостоит огромным давлениям, возникающим при электрогидравлических ударах, даже находясь внутри зоны разрушения, но может разрушиться от

удара либо о другие алмазы, либо о куски твердой породы в те моменты, когда он соприкасается с ними вблизи поверхности зоны канала разряда (в области сверхвысоких давлений). Однако так как алмазов в породе очень мало и порода не слишком тверда, то вероятность такого соприкосновения ничтожно мала.

Как показывает опыт, даже при специальной загрузке в электрогидравлическую дробилку нескольких кристаллов алмазов вместе с кусками наиболее твердых включений, содержащихся в кимберлитах, было получено тончайшее размельчение всей породы без каких-либо повреждений самих алмазов.

Чтобы сохранить наиболее крупные алмазы, следует вести процесс не непрерывно, а по стадиям, с отбором выделяющихся алмазов на каждой из этих стадий. Основная масса пустой породы (до 80 %) на первой же стадии дробления отходит в виде пульпы в отвал за счет избирательности электрогидравлического дробления. Таким образом, на последующие стадии дробления будет поступать все меньше материала, что может существенно облегчить и ускорить весь процесс выделения алмазов.

В настоящее время на ряде предприятий успешно эксплуатируются электрогидравлические дробилки для дробления алмазов, стекла, кварца. Так, только одна такая дробилка, работающая на Кабардино-Балкарском заводе алмазного инструмента, дает ежегодную экономию около 1 млн. руб.

5.5. Электрогидравлические устройства для коллоидного обогащения руд и бесшахтной добычи полезных ископаемых

Для дробления и измельчения пластических проводящих материалов (например, металлов или их проводящих соединений) были разработаны способ и устройство, позволяющие получать как крупнозернистые порошки этих металлов, так и весьма дисперсные их измельчения (см. рис. 4.38). Изложенный выше способ получения коллоидов положен также в основу способа коллоидного обогащения некоторых материалов (например, руд), содержащих проводящие включения (например, сернистые или углеродистые соединения металлов) [5].

При осуществлении этого способа во взвешенное в жидкости коллоидное состояние переходит вся проводящая часть материала, которая может быть удалена, а непроводящая часть остается в ванне. Поскольку ценным материалом может быть как проводящая, так и непроводящая часть данного материала, то способ позволяет обогащать любую из них [29]. Этим способом можно выделить, например, железистые включения, имеющиеся в составе технического электрокорунда, и, таким образом, обогатить непроводящую часть — корунд или выделить (отделить от пустой породы) проводящую часть руды типа медного колчедана и, следовательно, обогатить ее.

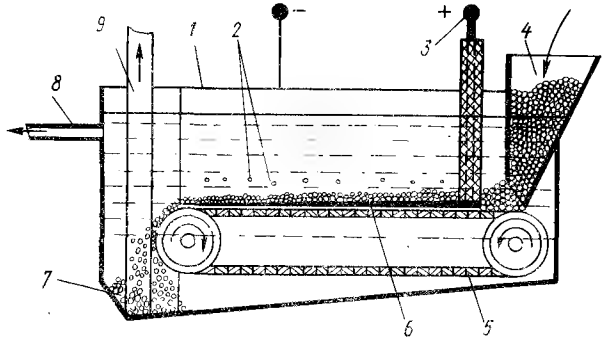


Рис. 5.20. Электрогидравлическое устройство для непрерывного коллоидного обогащения материалов:
1 – корпус ванны — отрицательный электрод; *2* — выводные отверстия трубопровода коллектора; *3* – положительный электрод, *4* — загрузочный бункер; *5* — лента транспортера; *6* — пластина положительного электрода; *7* — бункер для обогащенного материала; *8* — отвод коллоида; *9* — элеватор для выгрузки материала

Сущность способа та же, что и способа получения коллоидов металлов, но при разработке устройств для его использования в целях получения непрерывного процесса обогащения дно ванны разделения должно быть выполнено подвижным, с тем чтобы медленно двигающийся по нему материал успел полностью потерять свой проводящий компонент и был выгруженным в бункер, а на его место поступал бы свежий, необогащенный материал.

На рис. 5.20 предлагается один из вариантов такого устройства. Подлежащий обогащению материал подается в загрузочный бункер, откуда равномерным слоем поступает на конвейерную ленту транспортера, выполненную из непроводящего материала. Сверху, вдоль ленты (по ее середине), размещена тонкая и узкая пластина центрального электрода, благодаря этому обогащаемый материал в процессе движения по ленте постоянно контактирует с этой пластиной. Стенки ванны являются вторым отрицательным электродом. Таким образом, искровые разряды распространяются по обеим сторонам от оси конвейерной ленты к бортам удлиненной ванны. При соответствующей скорости движения конвейера в зависимости от мощности питающей силовой установки происходит полное разделение компонентов материала. Освобожденный от примесей материал или пустая порода попадает в приемный бункер, откуда элеватором выдается наружу, а образовавшийся коллоид непрерывно удаляется из ванны по трубопроводу. Расход жидкости в ванне пополняется по трубопроводам, размещенным по бортам ванны, откуда жидкость через отверстия выбрасывается тонкими струями, взбалтывая образующийся коллоид. При этом материал, подлежащий обогащению, должен загружаться в ванну разделения достаточно измельченным.

Способ пригоден также и для обогащения золота и других благородных металлов [3, 5].

Способ бесшахтной добычи токопроводящих полезных ископаемых вытекает из способа коллоидного обогащения материалов [3]. Электрогидравлическая технология бесшахтной добычи полезных ископаемых может осуществляться следующим образом. С поверхности, через сетку предварительно пробуренных скважин в рудном теле или пласте, производят взрывы ВВ, вызывающие раздробление и растрескивание пласта, с тем чтобы образующиеся в пласте трещины соединили скважины между собой. Скважины бурятся на расстоянии 10 –20 м друг от друга (в зависимости от рабочего напряжения ГИТ). В одни скважины опускают металлические трубы, одновременно служащие отрицательными электродами, а другие такие же трубы, но с пропущенными сквозь них высоковольтными кабелями являются положительными электродами. Каждая «положительная» скважина окружена четырьмя шестью «отрицательными» скважинами.

Для того чтобы наиболее полно охватить электрогидравлическим воздействием всю площадь пласта рудного залегания, через определенные промежутки времени «положительные» скважины меняются на «отрицательные» и наоборот, при сохранении того же принципа взаимного окружения одной «положительной» скважины несколькими «отрицательными». Через «положительные» скважины нагнетается вода, через «отрицательные» откачивается образующийся коллоид. Ввиду потребления при производстве этих работ значительных мощностей, а также в целях получения максимальной экономии электроэнергии при работе на высоких напряжениях рационально подавать в пласт ток разрядного контура ГИТ, питаемого непосредственно от ЛЭП, без трансформаторной подстанции.

Для того чтобы процесс мог начаться, достаточно, чтобы только одна из трещин соединила скважины противоположных знаков и заполнилась непрерывной лентой воды. Удаление коллоида расширит пути контакта, а последующая работа горного давления вызовет мощное растрескивание пласта. Поскольку вода в пласт подается под давлением, то независимо от пластового давления пропитка его водой и вымывание коллоида надежно обеспечиваются. По мере удаления образующегося коллоида, с возникновением пустот, горное давление будет разрушать пласт и далее, измельчая его на мелкие куски и значительно облегчая развитие процесса.

В силу способности разрядов мигрировать далеко в стороны от линии кратчайшего расстояния между электродами гарантируется удаление полезных ископаемых из разного рода «карманов», впадин, линз и других структурных неравномерностей пласта. Вода может быть использована любая, в том числе и пластовая, если она не слишком минерализирована. В ходе использования воды в качестве рабочей жидкости она насыщается

растворимыми соединениями таких элементов, как германий, уран, торий, и превращается в ценный рудный продукт или сельскохозяйственное удобрение и подлежит использованию.

Поднятый на поверхность коллоид полезного ископаемого подается в отстойники, откуда после отстаивания коллоид в виде густой пульпы (если это, например, уголь) поступает либо на брикетирование, либо на непосредственное сжигание в топках вместе с водой. Осветленная вода закачивается обратно в пласт.

Опытным путем установлено, что вода, слитая с коагулировавшего коллоида, вызывает быструю коагуляцию новой порции коллоида, если будет добавлена к ней. Это позволяет предполагать, что коагуляция начинается еще в процессе транспортирования коллоида из-под земли.

Представляется чрезвычайно перспективным извлечение этим способом угля из старых выработок и отвалов. В выработку предварительно опускают через старые шахтные или вентиляционные стволы электроды, соединенные с сетью надежно сваренных друг с другом неизолированных проволочных разветвлений, проложенных по штрекам, штольням и прочим горизонтальным выработкам. Затем разрушаются все целики и все выработки заполняются водой. Разработка отвалов осуществляется путем образования на терриконах обвалованных площадок, заполняемых затем слоем воды. По центру этих площадок размещаются положительные, а по краям — отрицательные электроды. По мере выработки угля на дно площадок засыпаются слои свежей породы, а бортовые валы поднимаются.

При подземной выработке рациональнее работать на высоких (до 500 кВ и выше) напряжениях. При наземной выработке (например, при разработке отвалов) представляет интерес работа на относительно низких напряжениях.

Одновременно с получением коллоида удаляются из угля и соединения серы. Сера при этом переходит либо в растворимые в воде соединения, либо в виде сероводорода уходит в воздух. Естественно, в обоих случаях сера должна быть утилизирована. Особенно эффективно применение этого способа для разработки самых бедных, «нерентабельных» угольных месторождений, состоящих из тонких прожилок угля между толстыми пластами пустой породы. При этом следует иметь в виду, что продуктивность электрогидравлической бесшахтной добычи угля (кроме прямой зависимости от параметров импульса тока и подаваемой мощности) зависит также и от проводимости угля.

5.6. Электрогидравлические устройства для активации и регенерации горных пород

Исследования, проводимые автором в начале 1960-х годов, были направлены на расширение возможностей применения электрогидравлического эффекта при обработке горных пород,

используемых в качестве строительного материала [4, 5]. Опыты показали, что при определенных условиях электрогидравлической обработки глина расщепляется на элементарные пластины, активность ее возрастает, так как поверхности ее частиц освобождаются от пленок оксидов и сорбированных продуктов. Частички гравия выщербляются в слабых местах-зонах выветривания, оставаясь при этом целыми, а их поверхности также освобождаются от пленок оксидов и сорбированных продуктов. Частички гравия и песка, прочность которых ниже средней, разрушаются в пыль и удаляются при промывке вместе с водой в отходы, в результате чего резко повышается средняя прочность песка и гравия. Цементные частички очищаются от пленок оксидов и сорбированных продуктов, слипшиеся конгломераты частичек распадаются, в связи с чем улучшаются показатели качества цемента.

При совместной обработке песка, гравия, цемента, глины может быть получено оптимальное для их последующего использования смешение материалов (в частности, при совместной обработке песка с глиной, песка с цементом, песка с гравием и цементом). Обработку следует вести на скорости прохождения, принятой для материала, который не может переизмельчаться (в данном случае — для песка и гравия).

Аналогично можно активировать и совместно обрабатывать известь, гипс, расщеплять слюду, асбест, графит и другие горные породы. Опытным путем установлено, что для максимальной активации перечисленных материалов, а при необходимости и для их смешения следует учитывать, что для гравия и песка переизмельчение недопустимо, а для глины и цемента вполне допустимо. Электрогидравлическую обработку этих материалов следует вести только на жестких режимах ($U \geqslant 50$ кВ; $C \leqslant 0{,}1$ мкФ).

При регулировании скорости прохождения материалов через зону обработки выходное отверстие электрогидравлической дробилки для дробления «внутренним ударом» снабжается регулируемым шибером. Для оценки качества обработки, по которой и определяется оптимальная скорость прохождения материала в дробилке, используют показатели седиментационных или реологических датчиков. Контроль качества обработки обеспечивается соединением этих датчиков с регулируемым шибером дробилки средствами обычной автоматики. Таким образом, задаваемое качество обработки поддерживается автоматически.

Для получения максимального эффекта активации гравия и песка и наибольшей производительности электрогидравлической дробилки необходимо предварительно (хотя бы грубо) разделить на фракции эти материалы. Оптимальные границы фракций для гравия следующие: 5—15 мм; 15—30 мм; для песка: 0—1 мм; 1—5 мм.

Последующая промывка — удаление тонких взвесей вместе с водой, являющаяся одним из этапов электрогидравлической обработки для песка, дает добавочный положительный эффект.

Электрогидравлическая активация продуктов - наполнителей бетона увеличивает прочность бетона на 25—40 % и позволяет употреблять окатанный гравий для изготовления наиболее прочных сортов бетона, не уступающих по качеству сортам бетона, приготовленным на щебне.

Источником получения щебня, гравия, песка может служить электрогидравлический способ разделения арматуры и бетонной массы неиспользуемых и уничтожаемых железобетонных изделий и конструкций. Способ совмещает в себе процессы электрогидравлического дробления и взрывания. Для этого железобетонную конструкцию или изделие погружают в ванну с водой, предварительно в нескольких местах обнажив ее арматуру для заземления или присоединения к ней отрицательного полюса электрической схемы. Затем с помощью электродов, размещенных на тележке (идущей по верху ванны) и расположенных на расстоянии 300—500 мм друг от друга, так чтобы перекрыть всю поверхность изделия по ширине, осуществляют электрогидравлическую обработку изделия разрядами, идущими на арматуру сквозь поры бетона.

При этом происходят интенсивное разрушение бетона и полное отслаивание его арматуры, позволяющее по окончании прохода электродов по всей длине изделия полностью выделить арматуру, удалить ее и, собрав куски бетона с поддона ванны, направить их на электрогидравлическую обработку для полного отделения бетона от частиц щебня и гравия.

Дальнейшее разделение бетона на щебень, гравий и песок осуществляют в электрогидравлических дробилках, выходные отверстия которых должны быть взяты несколько бо́льшими, чем диаметр самых крупных частиц гравия, использованного в бетоне. В результате процесса разделения получаются чистые арматура, щебень или гравий, крупный песок, цементное молоко и мелкий песок.

Процесс рационально вести на следующих режимах: $U = 40 \div 60$ кВ; $C = 1{,}0 \div 3{,}0$ мкФ. Расход энергии не превышает 2—3 кВт·ч на 1 т железобетонных изделий.

5.7. Электрогидравлические геолокатор и гидролокатор

Электрогидравлический эффект может быть использован для сейсмической разведки, поскольку он является идеальным источником мощных сейсмических и акустических импульсов, возникающих в окружающей разряд или тепловой взрыв ВТЭ жидкости [24].

С помощью электрогидравлических устройств можно получать разные типы сейсмических волн: обычные (как смесь волн), поверхностные, волны Релея. Отраженные от геологических напластований сейсмические и акустические импульсы воспринимаются затем акустическими и сейсмическими устройствами и фиксируют-

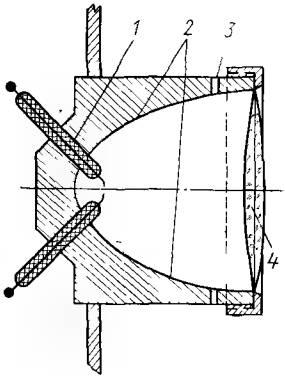


Рис. 5.21. Электрогидравлический гидролокатор: *1* — электроды, *2* — фокусирующая поверхность рабочей камеры; *3* — пористые отверстия для подачи отфильтрованной забортной воды, *4* — эластичная мембрана — акустическая линза

ся на экране радиолокатора. При этом по шкале дальностей можно судить о глубине залегания данного пласта, а по амплитуде отраженного импульса делать оценку плотности отразившего импульс пласта, предварительно зная величину затухания импульса в пластах вышележащих пород.

Электрогидравлический геолокатор [24] выполнен в виде массивного сферического отражателя с введенными в него разрядниками в изоляторах, с постоянным или регулируемым искровым промежутком между ними. К тыльной стороне отражателя крепится тормозной диск гидротормоза с подвесной серьгой. С помощью обычных средств зеркалу локатора можно придавать любое положение в пространстве. В целях торможения силы отдачи и увеличения полезной работы излучателя в нужном направлении кумулятивное устройство снабжается тормозной пластиной-диском, играющей роль гидравлического тормоза. Вращением излучающего устройства геолокатора может быть достигнут «круговой обзор» нижележащих напластований.

Смягчением или ужесточением излучения геолокатора, т. е. увеличением крутизны фронта импульса и уменьшением времени его осуществления (для «жесткого» излучения) или уменьшения крутизны фронта и увеличением продолжительности импульса (для «мягкого» излучения) можно осуществить послойное, избирательное «просвечивание» пластов каждого слоя на определенной глубине залегания данных напластований. Употребление синхронно работающих пар приемных устройств позволяет осуществить «стереопросвечивание» напластований.

В качестве ванны для помещения излучателя геолокатора используют неглубокую буровую, заполненную водой, либо естественный водоем.

Применение кумулятивного устройства в виде отражающего сферического зеркала позволяет фокусировать взрывную волну, исходящую от локатора, и одновременно с ней фокусировать и в значительной степени направлять сейсмическую и акустическую волны.

Аналогично работает и электрогидравлический гидролокатор (рис. 5.21).

Излучающая часть гидролокатора представляет собой цилиндр с полостью внутри, имеющей фокусирующую сферическую поверхность. Внутренняя полость закрывается эластичной мембраной, одновременно играющей роль акустической линзы. По-

лость связана с окружающей забортной водой через отверстия, закрытые пористыми пробками, свободно пропускающими и отфильтровывающими воду. Внутрь полости введены электроды в изоляторах, образующие в фокусе отражающей поверхности полости рабочий искровой промежуток. При включении ГИТ на рабочем искровом промежутке локатора возникает необходимых параметров электрогидравлический удар, служащий источником акустической волны, направляемой зеркалом гидролокатора на цель. Отраженные сигналы могут быть восприняты как устройством, помещенным в самом зеркале гидролокатора, так и вне его. В целях получения эффекта стереоскопичности этих устройств может быть два. Сигналы в их электрической трансформации поступают на обычную локаторную схему. Электрогидравлический гидролокатор позволяет эффективно вести поиск морских месторождений нефти и газа. Новый геофизический метод уже успешно прошел проверку в различных морских бассейнах.

Для повышения КПД и расширения рабочего диапазона фокусирования акустических волн для гидролокации и других целей одновременно с электрогидравлическим ударом или другим импульсным источником звука передающую среду сжимают со скоростью, превышающей скорость распространения звука в этой среде [98], например, тепловым взрывом сдвоенных конусов. При таком сжатии, когда скорость формирования среды, несущей в себе звуковое излучение, оказывается выше скорости распространения звука в этой среде, получается узкий направленный луч, обладающий очень большой энергией, значительно расширяющий возможности электрогидравлического гидролокатора. Режим взрыва ВТЭ при этом может быть следующим: $U=50$ кВ; $C=10$ мкФ; материал ВТЭ — алюминиевая фольга. Этот способ получения узких направленных пучков звуковых волн различных диапазонов частот и длин в жидких, газовых и плазменных средах найдет также применение в технике для контрольно-измерительных целей, дефектоскопии, ускорения различных химико-технологических процессов, образования эмульсий, суспензий, снятия пленок оксидов и т. д.

Глава 6

Применение электрогидравлического эффекта в химической промышленности

6.1. Общие положения

Использование электрогидравлического эффекта в химической промышленности и химическом машиностроении — одно из самых перспективных, но пока и наименее освоенных направлений в развитии электрогидравлики.

Теоретически обосновано и подтверждено экспериментами, что электрогидравлический эффект как метод механического, физического и химического воздействия на материалы может эффективно применяться для многих целей в химической промышленности: полимеризации — усложнения молекулярной структуры веществ, получения блок-полимеров, привитых полимеров и т. п.; деполимеризации — упрощения молекулярной структуры веществ; синтеза химических соединений — получения уже известных или новых соединений; повышения активности катализаторов; ускорения химических реакций; образования многовалентных ионов, возникающих под влиянием сверхмощных полей, давлений, температур и других факторов, сопутствующих процессу электрогидравлической обработки; выпадения осадков — ускорения кристаллизации или замедления ее; ускорения растворения веществ; обрыва сорбционных и других слабых химических связей с переходом в раствор, связанных с обрабатываемым материалом химических элементов или соединений [19].

В многочисленных экспериментах показана возможность получения при электрогидравлическом дроблении руд в специально подобранных реактивах, соединений некоторых металлов, пригодных для технологической переработки без дополнительных операций, в частности возможность выделения оксидов и солей германия из содержащих его углей [38], выделения урана в процессе электрогидравлического дробления гранита на строительный щебень и песок, а также многих редких и рассеянных элементов из горных пород, определены пути увеличения прочности гальванических покрытий с возможностью покрытия впадин и выемок в изделиях при импульсном электролизе очистки производственных стоков от различных химических загрязнений и другие направления использования импульсной электрохимии.

Определенная часть импульсной электрохимии находит применение в агропромышленных отраслях для получения комплексных удобрений, химической и биологической очистки сточных вод, обеззараживания органических субстратов, переработки растительного и животного сырья.

6.2. Электрогидравлические эмульгаторы и деэмульгаторы

Электрогидравлические удары способны весьма эффективно и быстро смешивать между собой в виде высокодисперсных эмульсий самые разнообразные вещества, которые затем могут долгое время не расслаиваться [5, 7, 19, 45]. Достигаемая дисперсность эмульсий зависит как от свойств самих смешиваемых компонентов, так и от энергии, затраченной на изготовление эмульсии, а при заданной энергии импульса — от времени обработки ее воздействием электрогидравлического эффекта. Эмульсии двух или нескольких несмешивающихся жидкостей могут быть получены различными способами, каждый из которых осуществляется с помощью специального устройства.

Электрогидравлические удары, диспергирующие жидкости в эмульсии, могут осуществляться как внутри объема самих смешиваемых жидкостей, так и вне его [45]. Учитывая, что многие жидкости (в том числе и вода) при электрогидравлическом воздействии претерпевают значительные химические изменения, осуществление электрогидравлических ударов внутри объема жидкостей может оказаться нежелательным. В этом случае электрогидравлические удары осуществляют в объеме вспомогательной жидкости (обычно воды), отделенной от объема, занятого смешиваемыми жидкостями, какой-либо эластичной мембраной (например, резиновой или из гофрированного металла).

На рис. 6.1, *а* представлен электрогидравлический эмульгатор для получения эмульсий, в которых электрогидравлический удар осуществляется в объеме одной из жидкостей (более тяжелой), на поверхность которой налита вторая (более легкая) жидкость. Устройство работает в непрерывном режиме, для чего в него постоянно вводятся смешиваемые жидкости, выводится образующаяся эмульсия.

На рис. 6.1, *б* изображено устройство для непрерывного получения эмульсий с разделением эластичной резиновой мембраной объемов, занятых смешиваемыми жидкостями и вспомогательной жидкостью, в которой осуществляются электрогидравлические удары.

Для экстрагирования компонента из твердых тел с образованием эмульсии разработаны устройства, приведенные на рис. 6.2, *а* (для твердых тел, всплывающих в данной жидкости) и на рис. 6.2, *б* (для твердых тел, тонущих в данной жидкости). Устройство, приведенное на рис. 6.2, *б*, выполнено с отделением рабочего объема со вспомогательной жидкостью эластичной мембраной.

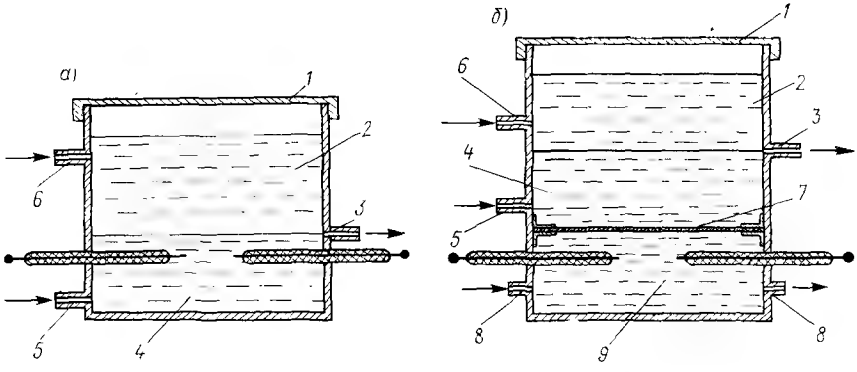


Рис. 6.1. Электрогидравлические эмульгаторы: *а* — без мембраны; *б* — с мембраной;

1 — крышка; *2* — объем, заполненный более легкой жидкостью; *3* — отвод готовой эмульсии; *4* — объем, заполненный более тяжелой жидкостью; *5*, *6* — патрубки для подачи тяжелой и легкой жидкостей соответственно; *7* — мембрана; *8* — отвод и подвод рабочей жидкости; *9* — объем, заполненный рабочей жидкостью (водой)

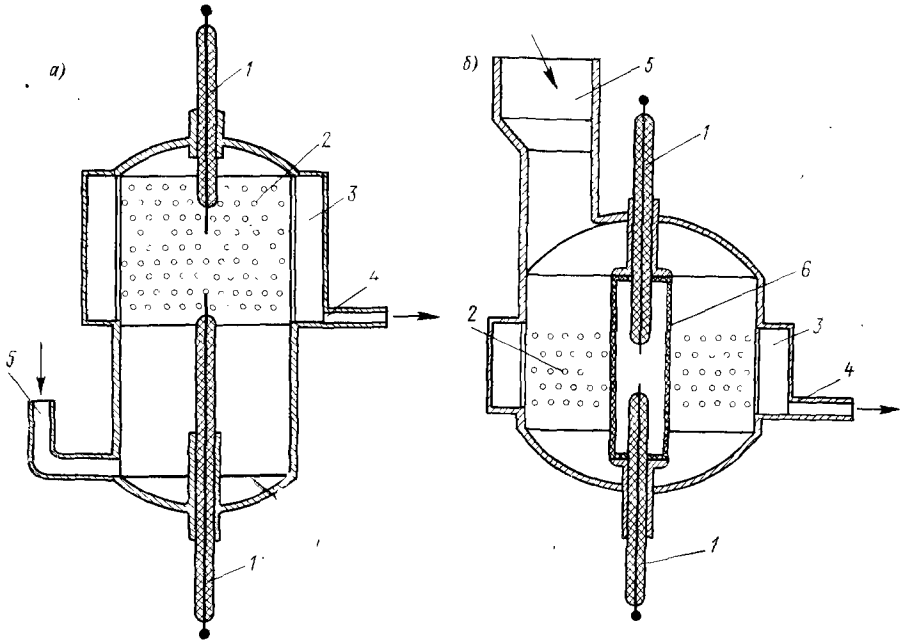


Рис. 6.2. Электрогидравлические экстракторы-эмульгаторы: *а* — без мембраны; *б* — с мембраной;

1 — электроды; *2* — сетка выводных отверстий в корпусе; *3* — приемный бункер; *4* — выводной патрубок; *5* — подвод жидкости и обрабатываемого материала; *6* — мембрана

Устройство, изображенное на рис. 6.2, *а*, целесообразно применять, например, для получения масла из всплывающего исходного сырья (в частности, из семян хлопка [44]). Под действием электрогидравлических ударов содержащееся в твердом сырье масло переходит в воду, образуя эмульсию, и одновременно стерилизуется. Затем из полученной эмульсии обычными приемами (например, сепарацией) извлекается масло.

Для получения жира из тонущего сырья (например, из животных тканей) может быть использовано устройство, изображенное на рис. 6.2. *б*, в котором сырье отделено от зоны разряда эластичной мембраной [45]. Выделяющийся из сырья жир переходит в воду, образуя эмульсию. Затем жир извлекается из эмульсии обычными способами.

Электрогидравлической обработкой можно получать стойкие эмульсии самых различных веществ, например бензин — вода, китовый жир — вода и т. п., можно также гемогенизировать обычное молоко. Некоторые эмульсии, полученные этим путем, не расслаиваются годами. Так, эмульсия с составом: 6 л воды на 7 л нефти, полученная электрогидравлическим эмульгированием на режиме: $U=40$ кВ; $C=0{,}1$ мкФ; $l_р=30$ мм, не расслаивается в течение трех лет и более.

Электрогидравлический способ получения эмульсий чрезвычайно перспективен для получения стерильных эмульсий. В одном из опытов полученная электрогидравлическим эмульгированием эмульсия из подсолнечного масла и воды в количестве до 20 $см^3$ вводилась в кровь подопытными кроликам. Из 14 подопытных животных ни один не погиб, хотя исходные продукты были далеко нестерильны (водопроводная вода, разливное масло). Отсюда можно сделать вывод не только о высокой дисперсности полученной эмульсии (ее частицы беспрепятственно прошли через капилляры), но и об обеззараживающем действии электрогидравлического эмульгирования.

С целью повышения КПД электрогидравлических устройств для эмульгирования и перемешивания материалов была разработана установка, использующая вакуум кавитационной полости. В этой установке один из электродов выполнен полым, через него в зону наиболее эффективного воздействия — непосредственно в кавитационную полость — подается материал. Усилить эмульгирующее действие электрогидравлического эффекта можно также кумулятивным действием сверхвысоких давлений. Для этого среду, в которой осуществляется электрогидравлическая обработка, подвергают сжатию при помощи теплового взрыва фокусирующих взрывающихся тепловых элементов, выполненных, например, в виде конуса [98].

Повысит эмульгирующее действие электрогидравлического эффекта и специальная форма рабочей камеры (рис. 6.3), расположение электродов на определенной глубине, обеспечивающей выброс жидкости (использование эффекта воздушной кавитации

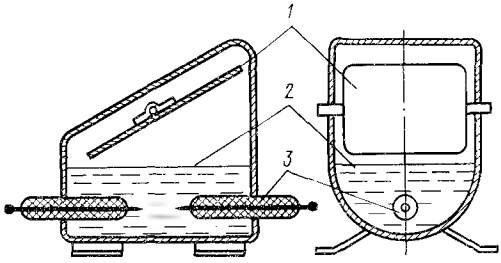


Рис. 6.3. Электрогидравлический эмульгатор, использующий метод воздушной кавитации: *1* — отражатель; *2* — уровень рабочей жидкости, *3* — электроды

[43]), а также установление над жидкостью перегородки с приспособлением, позволяющим изменять угол ее наклона к поверхности жидкости.

Электрогидравлическое эмульгирование и экстрагирование лекарственных веществ из растительного сырья успешно применяются в Болгарии. Процесс эмульгирования наиболее эффективен в непосредственной близости от зоны разряда, но эффективность эмульгирования быстро падает с удалением от зоны разряда. Опытным путем установлено, что при дальнейшем увеличении расстояния от зоны разряда эффект эмульгирования не только полностью исчезает, но и сменяется обратным процессом — деэмульгированием.

Таким образом, наливая эмульсию в удлиненный сосуд, в нижней части которого осуществляются электрогидравлические удары, можно получить в его верхней части постепенное расслоение этой эмульсии на составляющие ее компоненты. Процесс деэмульгирования может быть осуществлен и как непрерывный. На рис. 6.4 приведено устройство для непрерывного деэмульгирования. Эмульсия, непрерывно подаваемая в корпус устройства по трубопроводу и подлежащая разделению, поступает в среднюю часть деэмульгатора и разделяется в нем. Более легкий компонент, всплывая, удаляется по трубопроводу, расположенному в верхней части устройства, более тяжелый, собираясь внизу, удаляется по трубопроводу, расположенному в нижней его части. Разряд осуществляется в вспомогательной жидкости, которая отделена от рабочего объема эластичной мембраной [5, 45].

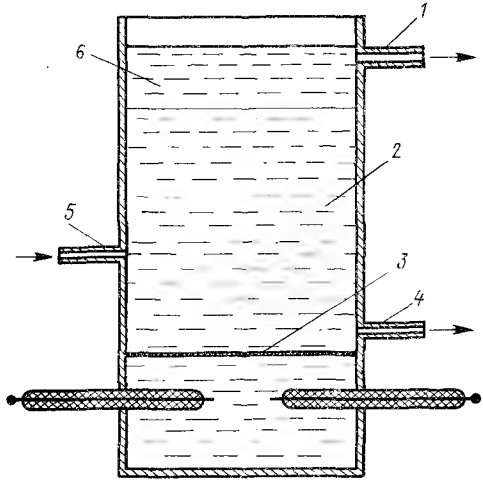


Рис. 6.4. Электрогидравлический деэмульгатор:
1 — отвод легкого компонента; *2* — объем, занятый разделяемой эмульсией; *3* — мембрана, *4* — отвод тяжелого компонента, *5* — подача эмульсии; *6* — всплывающий, более легкий, компонент

6.3. Электрогидравлическое выделение газов из жидкостей и получение пены

Любая жидкость, содержащая растворенные газы, подвергнутая действию электрогидравлических ударов, обнаруживает способность интенсивно выделять растворенные в ней газы [4]. В жидкостях, ионная проводимость которых невысока (например, в морской воде), электрогидравлический удар, необходимый для удаления растворенных в ней газов, может быть получен от специально сформированного в этой воде искрового разряда. В жидкостях с высокой ионной или электронной проводимостью, в которых искровой заряд затруднен (или практически невозможен), следует воспользоваться методом получения электрогидравлических ударов с помощью теплового взрыва ВТЭ. В необходимых случаях электрическую или тепловую изоляцию ВТЭ (например, при обработке расплавов) выполняют из керамического тугоплавкого материала.

Необходимо отметить, что при электрогидравлической дегазации жидких сред (например, расплавов) одновременно может осуществляться и очищение этих сред от всякого рода механических примесей (например, шлаков, которые при этом всплывают на поверхность и затем обычными способами удаляются из жидкости [3, 5, 9]).

Если в данной жидкости создать разряд или осуществить тепловой взрыв по каким-либо причинам затруднительно, то электрогидравлический удар следует осуществить в объеме другой жидкости (чаще всего в воде), а его действие передать через мембрану, стенку или стержни на объем обрабатываемой жидкости, либо соприкасающейся с данной мембраной, стенкой, либо имеющей погруженный в нее передающий возмущение стержень или шток. Хотя действие электрогидравлического удара будет в этих случаях ослабленным, тем не менее дегазация произойдет.

В проведенных опытах электрогидравлической обработке подвергались различные жидкости, содержащие растворенные газы, при этом определялось дегазирующее действие отдельных факторов, составляющих электрогидравлический эффект. Эксперименты показали, что электрогидравлическое воздействие на жидкость как фактор газовыделения является не только комплексным, но и таким, при котором отдельные составляющие его оказывают друг на друга взаимные положительные влияния. Например, образующиеся ионы и кавитационные пузырьки служат центрами газовыделения. Каждый из действующих факторов, составляющих электрогидравлическое воздействие на жидкость, оказывает положительное газовыделяющее влияние на другие, в силу чего газовыделяющий эффект превышает сумму эффектов отдельных составляющих. Сравнивалась эффективность электрогидравлического воздействия с известными методами дегазации жидкости (например, нагреванием). Было установлено, что дегазирующее

воздействие единичного электрогидравлического удара с запасенной энергией в накопителе, равной 25 Дж на единицу объема жидкости, содержащей растворенные газы, оказывается в 3 раза эффективнее нагревания.

Поскольку различные газы, входящие в состав какой-либо газовой смеси, растворяются в жидкостях и выделяются из них неодинаково, представляется возможным разделить или обогатить какими-либо газами любую газовую смесь. С этой целью газы необходимо периодически или постоянно растворять в жидкости и, разделяя или обогащая остаток, постоянно или периодически выделять их из жидкости, получая таким образом разделенный или обогащенный необходимым газом состав газовой смеси.

Для смешивания жидкостей и газов до состояния пены следует использовать метод «воздушной кавитации» [43]. Устройства для смешивания, основанные на этом методе, аналогичны электрогидравлическим эмульгаторам (см. рис. 6.1).

6.4. Электрогидравлические устройства для очистки топливных жидкостей

Как показали многочисленные эксперименты, при электрогидравлической обработке топливные жидкости интенсивно теряют разного рода вредные примеси, и прежде всего серу. Сернистые соединения активно удаляются из топлива либо в виде летучих соединений сероводорода, либо выпадают в осадок.

Проведенная непосредственно после электрогидравлической обработки сорбционная очистка показала, что сера, ранее находившаяся в виде несорбируемого соединения, после электрогидравлической обработки переходит в сорбируемое. Еще более активное связывание серы наблюдалось в том случае, если в состав топливной жидкости входил определенный реагент, подвергшийся электрогидравлической обработке вместе с ней. В электрогидравлическом устройстве, одновременно удаляющем серу и обезвоживающем топливные жидкости, процесс обезвоживания осуществляется действием электрогидравлической обработки на одном из деэмульгаторов с таким расчетом, чтобы топливная жидкость находилась вне зоны давлений, в которой еще идет процесс эмульгирования, но там, где особенно хорошо идет процесс удаления серы.

Процесс удаления серы и обезвоживания следует проводить в аппарате проточного типа, состоящем из двух камер, выполненных, например, в виде двух концентрически расположенных труб различного диаметра. Внутренняя камера электрогидравлического эмульгатора состоит из отрезка трубы с фланцами, подсоединяемыми к трубопроводу, по которому непрерывно протекает данная топливная жидкость, и размещенными в этой трубе-камере одной или несколькими парами электродов. Посредством электрогидравлических ударов в камере осуществляется процесс удаления серы.

Летучие и осевшие на дно продукты со связанной в них серой удаляются обычными средствами (например, в колонне на выходе из камеры). Все стенки камеры-эмульгатора выполняются в виде мембран. Камера размещается внутри другой, большей по размеру, камеры-деэмульгатора, через которую в обратном направлении протекает уже лишенная серы топливная жидкость.

При этом тот же электрогидравлический удар, который возник во внутренней камере и уже осуществил удаление серы из жидкости, будет одновременно действовать на жидкость, находящуюся во второй (внешней) камере, размещенной на большем расстоянии от разряда, вызывая в жидкости деэмульгирование обезвоживание топливной жидкости. Таким образом, в одном агрегате и одновременно могут осуществляться оба процесса.

Если агрегат дополнить еще одной колонной, содержащей вещества, связывающие выделяющуюся воду (а также если ввести эти вещества в топливную жидкость при электрогидравлической обработке на второй ее ступени), то процесс обезвоживания будет протекать еще более интенсивно.

Процесс удаления серы действием электрогидравлического эффекта на нефть основан на сложных физико-химических явлениях, возникающих при электрогидравлическом ударе, в результате которых возрастает запас свободной энергии в частицах дисперсной фазы, причем снижается поверхностное натяжение жидкостей и отделение дисперсной системы облегчается. Ударные волны, распространяющиеся практически мгновенно по всему объему жидкости, создают мощные гидропотоки активированных жидкостей (нефти и воды), контактирующие на поверхности раздела фаз нефть — вода. Контакты происходят при воздействии кратковременных сверхвысоких давлений и акустических колебаний широкого спектра. В этих экстремальных условиях происходят быстропротекающие химические реакции между ионизированными молекулами воды, эмульгированной в нефти, и содержащимися в ней сернистыми соединениями [19]. Образуются продукты коагуляции, выпадающие в виде осадка, часть сернистых соединений распадается до низкомолекулярных газообразных веществ, и на выходе остается обезвоженная и лишенная серы нефть.

6.5. Электрогидравлическое отделение резины от корда

С помощью электрогидравлической обработки можно успешно отделить резину от корда в изношенных резинокордных изделиях [9, 78]. Для этого пришедшие в негодность резинокордные изделия (автопокрышки, резиновую обувь) измельчают на рубильных машинах, а затем подвергают электрогидравлической обработке на жестких режимах ($U \leqslant 50$ кВ; $C \geqslant 0{,}1$ мкФ) в дробилках песчаного типа.

Установленная зависимость эффективности электрогидравлической обработки от размеров частиц измельченных резинокорд-

ных изделий позволяет рекомендовать их измельчение до размеров не более 5 мм. При этом размеры выходных отверстий дробилок должны быть на 1—1,5 мм меньше, чем размеры частиц резинокордных изделий

Образующуюся после электрогидравлической обработки смесь разлохмаченных нитей корда и частиц резины сушат и подают на чесальные машины, где корд и резина полностью отделяются друг от друга. Лишенная корда, тщательно промытая электрогидравлической обработкой резина может снова идти в производство. Разлохмаченный и расчесанный корд, выделенный из старых резиновых изделий, представляет собой обрезки волокон длиной в 1—2 см, которые благодаря высоким качествам первоначального материала могут быть вторично использованы в текстильной промышленности. Интенсифицировать процесс электрогидравлического отделения резины от корда можно, используя в качестве рабочей среды бензин или водную эмульсию бензина.

При электрогидравлической обработке изношенных прорезиненных тканей предварительное измельчение производят до частиц диаметром 5 –10 см. Для получения латекса при электрогидравлической обработке в качестве жидкой рабочей среды используют бензин или другой растворитель резины.

Следует отметить, что эффективное электрогидравлическое дробление эластичной резины также возможно в том случае, если резине сообщить свойства хрупкого тела. Этого можно достичь, предварительно замораживая резину до состояния хрупкости или изменяя параметры импульсов в сторону повышения крутизны фронта и уменьшения их длительности. При этом можно достичь такого положения, когда сверхкороткие электрогидравлические удары будут возникать и развиваться за столь короткое время, что упругость резины для них станет неощутимой и резина будет дробиться как очень хрупкое тело.

6.6. Электрогидравлические устройства для очистки и обеззараживания жидкостей и органических субстратов

Электрогидравлический эффект обладает мощным комплексным воздействием на жидкость. Электромагнитные поля разрядов, образование плазмы и ее воздействие на последующие процессы, интенсивная ионизация и рекомбинационные процессы ионов в зоне разряда делают воздействие электрогидравлического эффекта на жидкость сходным с процессами радиационной химии и способствуют возникновению в жидкости сложных химических соединений. Хотя импульс тока, вызывающий электрогидравлический эффект, практически униполярен, переход его через нулевое значение и перемена знака напряжения в конце каждого импульса еще более усложняют протекающие при этом химические процессы, определяя тот факт, что при электрогидравлическом воздействии на жидкость в ней протекают мощные, носящие им-

пульсный характер и одновременно идущие процессы окисления и восстановления, которыми можно управлять, усиливая или ослабляя каждый из них с помощью способов и приемов, описанных ранее.

Установлено, что если жидкость (воду или другие жидкие при нормальных условиях вещества) подвергать действию электрогидравлического удара, создаваемого электрическими импульсами длительностью 10^{-5} 10^{-7} мкс при мгновенной мощности импульса в 50—1000 МВт, то структура жидкости изменяется. Например, вода обогащается молекулами талой воды, возникающими обычно при таянии льда, изменяются химическая и биологическая активность жидкости [86].

Электрогидравлические удары способны вызывать в воде появление активных свободных радикалов, атомарных кислорода и водорода, образование соединений азота и даже простейших аминокислот. Воздух и другие газы, растворенные в воде, способствуют осуществлению этих процессов [9, 51, 52].

В опытах, поставленных в начале 50-х годов, было обнаружено, что микробная флора воды, в первую очередь бактериальная, под действием электрогидравлических ударов интенсиво гибнет. Исходя из того, что электрогидравлический эффект является мощным источником ультразвука (звуковое давление при работе электрогидравлической установки в диапазоне 10—40 кГц на расстоянии 1 м от источника составляет $2 \cdot 10^6$ Па), можно считать, что ультразвук служит одной из основных причин, вызывающих интенсивную гибель микроорганизмов.

Аналогичное действие на микроорганизмы оказывают ультрафиолетовое и рентгеновское излучение плазмы канала разряда, а энергичное окисляющее действие атомарного кислорода, образующегося при электрогидравлических ударах, буквально сжигает все органическое, находящееся в воде. Исследования последних лет дали обширный материал для наблюдений над поведением бактериальных клеток и вирусов, подвергнутых электрогидравлической обработке. Опытами установлено, что прямое воздействие разряда губительно действует на суспендированные в жидкости микроорганизмы и жидкость, полученная после соответствующей электрогидравлической обработки, приобретает наведенную бактерицидность, не снижающуюся с течением времени. Бактерицидное действие распространяется на все виды бактерий и даже вирусов. При этом, как правило, полностью разрушаются бактериальные клетки и даже отдельные их фрагменты. При соответствующем режиме обработки может быть разрушена любая из составляющих клеточной структуры.

В дальнейшем удалось установить, что получаемое этим путем обеззараживание жидкостей совершается весьма интенсивно, со скоростью, пропорциональной количеству и энергии импульсов, вызвавших электрогидравлические удары в данном объеме жидкости, а возможность направленного изменения режимов

электрогидравлической обработки позволяет пользоваться широким диапазоном его действия [51]. Так, в малых дозах и на мягких режимах электрогидравлический эффект может выступать не как фактор разрушения, а только как способ угнетения микроорганизмов. Отсюда возникает возможность использования этого метода для получения различных вакцин и других бациллярных и клеточных препаратов с пониженной или измененной патогенностью микробов, а также препаратов из убитых бактерий и вирусов [77]. Условия стерильности производства облегчаются тем, что, как уже указывалось, электрогидравлический эффект сам является мощным бактерицидным фактором.

В подавляющем большинстве случаев прямое действие разряда или теплового взрыва, создающего электрогидравлический удар, не вносит в получающийся бактериальный продукт никаких вредных примесей, кроме коллоидных частиц металла электродов. Однако их можно или удалить обычными средствами, или же сами электроды могут быть изготовлены из такого металла, примесь которого не портит конечный продукт. В тех случаях, когда любые примеси нежелательны, или даже категорически исключены, электрогидравлическое воздействие осуществляют через мембрану, которая все же снижает эффект воздействия. Однако, когда электрогидравлической обработке подвергаются (например, в целях диспергирования или обеззараживания) какие-либо пищевые продукты, для полного устранения вредного влияния разряда на жидкость зону разряда отделяют от обрабатываемого продукта эластичной мембраной и осуществляют разряд в отдельной камере, заполненной водой. В этом случае электрогидравлическая обработка требует значительно бóльших энергетических затрат.

Опыты свидетельствуют о том, что атомарный кислород, перекись водорода, соединения азота и другие компоненты интенсивно воздействуют на разного рода загрязнения жидкостей, нейтрализуя, связывая и уничтожая их. Опытным путем также установлено, что различного рода объекты, помещенные в объем жидкости, подвергаемой обработке, тоже интенсивно обеззараживаются по всей поверхности, соприкасающейся с жидкостью, и в меньшей степени на поверхностях, не соприкасающихся с ней.

Таким образом, помимо питьевых и сточных вод, предлагаемым способом можно обеззараживать многие пищевые продукты, в том числе консервируемые, а также одежду и предметы оборудования.

Для очистки сточных вод чрезвычайно перспективным является разработанный метод «бактериального взрыва», дающий возможность получения селекционно отобранных бактерий [77]. Опытным путем было установлено, что при электрогидравлической обработке воды, содержащей какую-либо микрофлору, в ней происходит своеобразный «искусственный отбор», при котором, как и при естественном отборе, сначала погибают слабые и только

в последнюю очередь наиболее сильные организмы, причем эта закономерность распространяется не только на различные виды микроорганизмов, подвергающиеся одновременному электрогидравлическому воздействию, но и на каждую группу организмов какого либо одного вида.

Поэтому, если прекратить процесс электрогидравлической обработки в момент, когда в жидкости остались только наиболее жизнеспособные представители интересующего нас вида микроорганизмов, то мы вправе ожидать, что они, получив в свое распоряжение среду, насыщенную питательными растворами, полученными в результате разрушения здоровых (а не погибших от каких-либо других причин) микроорганизмов, и соединениями, выделенными электрогидравлическим воздействием из воды или из воздуха, начнут чрезвычайно быстро размножаться. И действительно, жидкость, постояв некоторое время без видимых изменений, пока бактерицидные свойства ее еще сохраняются, в дальнейшем настолько быстро насыщается микрофлорой, что процесс этот внешне становится похожим на взрыв (что и определило его название). В частности, именно при помощи бактериального взрыва в разного рода почвах и торфе мы добиваемся того, что массовое содержание в них растворимых соединений азота (в основном за счет связывания азота воздуха бактериями) за короткий срок (5—10 дней) увеличивается в несколько раз.

Отсюда возникает возможность комбинированной биоэлектрической очистки сточных вод, использующей все виды воздействия на загрязнения. Имея дело с водой, содержащей как бактериальные, так и химические загрязнения, совместив электрогидравлическую обработку ее с такой же обработкой предварительно внесенными в нее реактивами и катализаторами, можно одновременно уничтожить в ней всю бактериальную флору (а равно и ликвидировать все засорения ее органическими загрязнениями) и очистить ее от различных химических загрязнений. Осуществить это оказывается возможным в связи с тем, что если некоторые микроорганизмы, принципиально способные очищать воду от многих интересующих нас видов химических загрязнений в обычных условиях, при энергичной конкуренции всех других микроорганизмов оказываются неспособными дать желаемый нам быстрый и экономически выгодный эффект, то в созданных нами искусственных, особо благоприятных условиях их развития их действие может оказаться значительно эффективнее остальных методов очистки. Остановив процесс электрогидравлической обработки воды в определенный момент (дозируемый величиной энергетических затрат на каждую единицу ее объема), можно сохранить в ее составе интересующие нас виды микроорганизмов (а при желании и подсеять их) и, осуществив в ней затем бактериальный взрыв, добиться полной очистки воды от всех видов загрязнений.

Опыты показали, что в каждой единице объема жидкости нарастание количества микроорганизмов подчинено простому зако-

ну: резко возрастает в первые часы или дни после электрогидравлической обработки, а затем замедляется, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному пределу. По виду кривая бактериального взрыва схожа с обычными кинетическими кривыми, характерными для множества химических реакций. Аналогичному закону следует и кривая биологической продуктивности микроорганизмов (например, кривая накопления в растворе продуктов их жизнедеятельности или объема переработанного ими продукта или кривая накопления соединений азота).

Очевидно, экономически выгодным является использование короткого периода, соответствующего подъему кривой. Дальнейшая выдержка, хотя и дает некоторое небольшое увеличение продукта, но происходит медленно, поэтому практического значения не имеет.

Опыты также показали, что если при развитии процесса бактериального взрыва до указанной выше оптимальной точки развития кривой в этот момент осуществить вторую электрогидравлическую обработку полученного продукта, то в нем затем возникают второй бактериальный взрыв и второе (добавочное) накопление интересующего нас продукта, общее количество которого таким образом возрастает. По достижении оптимальной точки развития могут быть осуществлены третья электрогидравлическая обработка и третий бактериальный взрыв и т. д. Каждый последующий бактериальный взрыв дает примерно на 30 % меньший выход продукта, чем предыдущий, однако экономическая целесообразность многократного их осуществления очевидна.

Исходя из изложенного, технология биоэлектрической очистки сточных вод сводится к их периодической ступенчатой электрогидравлической обработке с добавлением специальных для каждого типа воды катализаторов и периодическим созданием в обрабатываемой воде, в устройствах типа отстойников целенаправленных бактериальных взрывов с сохранением или подсевом определенных видов

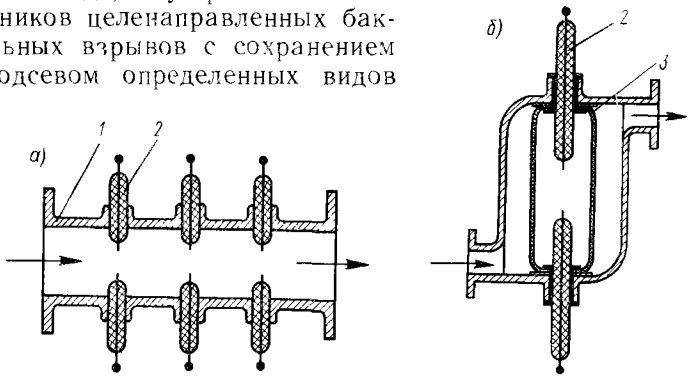


Рис 6.5. Электрогидравлические устройства для очистки и обеззараживания сточных вод: *а* — без мембраны; *б* — с мембраной.

1 — проточная камера; *2* — электроды; *3* — мембрана

и штаммов микроорганизмов. Общие энергетические затраты при такой обработке, по опытным данным, не превышают 0,5 кВт·ч на 1 м^3 воды.

Все конструктивные варианты электрогидравлических устройств для очистки сточных вод будут содержать общие основные элементы. Обычно они выполняются в виде трубы со встроенными во втулках, проходящих сквозь ее стенки, парами электродов. Положительные электроды при этом изолируются, а отрицательные могут быть частью самой трубы. Каждая пара электродов питается от самостоятельного разрядного контура, заданные группы которых, в свою очередь, питаются от общего для них источника питания ГИТ.

В устройстве, изображенном на рис. 6.5, *а*, обеззараживаемая жидкость непрерывно (например, насосом) перекачивается через полость устройства, выполненного в виде трубы. Корпус устройства снабжен несколькими парами разрядников, электроды которых пропущены в изоляторах через стенку корпуса. Электрогидравлические удары обеззараживают жидкость в потоке. Скорость обеззараживания пропорциональна энергии импульсов [52].

В устройстве, изображенном на рис. 6.5, *б*, обеззараживаемая жидкость непрерывно подается через патрубок. Заполняющая полость корпуса жидкость подвергается действию электрогидравлических ударов, возникающих на разряднике, электроды которого пропущены в изоляторах внутрь корпуса, и через второй патрубок удаляется уже обеззараженной. Зона разряда отделена от жидкости эластичной мембраной, полость которой заполнена водой, непрерывно обновляемой обычными средствами. В случае необходимости введение газов, жидкостей или порошков в зону разряда осуществляется любым способом, в том числе и введением их через полость внутри трубчатых электродов [52].

Обеззараживание различных предметов осуществляется путем помещения их в полости подобных устройств, при выполнении устройств по первому и второму вариантам. Непрерывное движение жидкости при этом необязательно. Простота устройств облегчает возможность автоматизации управления и регулирования процессов очистки, а также дает возможность создавать компактные установки любой производительности.

Электрогидравлические очистные устройства могут найти самое широкое применение во всех отраслях промышленности при очистке сточных вод, в коммунальном хозяйстве при очистке питьевых вод и стоков, в микробиологической и фармацевтической промышленности для получения вакцин и сывороток, в пищевой промышленности для обеззараживания соков, молока, вина, джемов и других продуктов, а также в сельском хозяйстве для очистки животноводческих стоков и обеззараживания субстрата и питательного раствора при гидропонном выращивании растений [3].

Глава 7

Использование электрогидравлического эффекта в агропромышленных отраслях

7.1. Электрогидравлические почвообрабатывающие устройства

В процессе исследований было обнаружено, что при электрогидравлическом дроблении горных пород и других материалов многие химические элементы и их соединения, входящие в состав этих пород, переходят в воду в виде растворимых соединений в количествах, достигающих 90—95 % от массового содержания их в исходном материале.

Переход химических элементов и их соединений в водный раствор объясняется тем, что при электрогидравлической обработке одновременное влияние и сложный механизм всех действующих факторов электрогидравлического эффекта приводят к разрыву сорбционных и периферических химических связей и даже к образованию новых соединений. Так, при электрогидравлической обработке угля выделяются более 50 % содержащегося в нем германия и еще 26 элементов в виде различных их соединений [38], а при электрогидравлической обработке гранита — до 90 % урана и еще большее количество различных элементов в виде их соединений, растворенных в воде. При этом чем беднее как руда будет данная горная порода, тем интенсивнее и с меньшими затратами энергии происходит выделение из нее в раствор содержащихся в ней химических элементов. С этой точки зрения все наши почвы являются бедными «рудами», и поэтому выделение в раствор содержащихся в почве элементов должно проходить весьма эффективно. Уже первые опыты по электрогидравлической обработке почвы полностью подтвердили это предположение.

Исследованиям были подвергнуты 14 образцов почв различных климатических зон СССР. Образцы обрабатывались в порционной электрогидравлической дробилке при одинаковом режиме: $U = 40$ кВ; $C = 0{,}1$ мкФ; $l = 15$ мм с одинаковым в каждом опыте соотношением твердой и жидкой фаз. Анализами было установлено, что в результате обработки из почвы в растворимое в воде состояние переходит более 30 химических элементов в виде различных соединений, а всего из 1 т почвы могут быть получены десятки килограммов этих элементов в растворимых соединениях вместо около 250 г при естественном растворении.

Дальнейшие исследования показали, что процесс разложения нерастворимых почвенных солей вызывается комплексным действием ряда факторов, составляющих электрогидравлический эффект. Так, специфика получения сверхдлинного разряда в воде обусловливает преобладание в зоне разряда анионов OH^-, которые интенсивно переходят в перекись водорода, в свою очередь распадающуюся на H_2O и O, что вызывает энергичное окисление образовавшимся активным атомарным кислородом до этого нерастворимых и труднорастворимых солей почвы.

Таким образом, в условиях электрогидравлической обработки все процессы разрушения сложных почвенных солей, протекающие в естественных условиях чрезвычайно медленно, осуществляются мгновенно. Не менее важно и то, что изменение параметров разряда позволяет сделать эти процессы управляемыми, избирательно влиять на их протекание.

Кроме того, почва является полидисперсной системой, в которой высокодисперсная ее часть играет главную роль в питании растений. Поэтому чем выше процент высокодисперсной части почвы относительно всей ее массы, тем более плодородной оказывается почва. При электрогидравлической обработке происходит измельчение бóльшей части почвы до частиц, имеющих диаметр 0,002 мм. Таким образом, размер образующейся поверхности становится бóльшим, чем даже у наиболее высокодисперсных илистых фракций обычной почвы.

Образовавшиеся высокодисперсные частицы активно взаимодействуют с соединениями, перешедшими в раствор, в силу чего такие процессы, как растворение и сорбция, количественно возрастают.

Опыты показали, что при электрогидравлической обработке воды, взятой из любого водоема, в ней быстро увеличивается число растворимых соединений азота. При очень небольших затратах энергии число растворенных в воде соединений азота может возрасти в 300 и более раз. Вода превращается в азотное удобрение и по существу может в некоторых случаях служить самостоятельным удобрением полей, способным активно выщелачивать из почвы и переводить в растворимое состояние химические элементы, служащие питанием для растений. Чтобы еще более насытить раствор соединениями азота, можно сквозь воду непрерывно продувать воздух под очень небольшим давлением.

Потребности в воде для электрогидравлической обработки полей весьма незначительны — около 10—15 $м^3$ на 1 га, что составляет всего 5—10 % от нормы затрат воды на дождевание и 2—3 % от нормы вегетационных поливов по бороздам или напуском, а при гнездовой культуре растений расход воды может быть сведен до минимума. Энергетические затраты силовой установки трактора, питающей электрогидравлическую установку, не превышают 30 кВт на 1 га, что определяет и себестоимость внесения удобрений (примерно 10 коп. на 1 га).

Таким образом, электрогидравлическая обработка почвы способствует экономически выгодному переводу в раствор содержащихся в почве полей и в воздухе азота, фосфора, микроэлементов, которые в растворимом состоянии легко усваиваются растениями. Тем самым можно резко снизить потребность полей в удобрениях, а зачастую и вовсе обойтись без них [60].

Проведенные эксперименты и производственные испытания позволили разработать ряд электрогидравлических почвообрабатывающих устройств для различных систем земледелия.

В простейшем почвообрабатывающем электрогидравлическом устройстве (рис. 7.1) в качестве основного агрегата, в котором происходит обработка почвы, используют электрогидравлическую дробилку. Кроме почвы, электрогидравлической обработке в дробилке подвергают воду, предназначенную для полива растений, воздух, выхлопные газы трактора или газообразный азот [61].

Для увеличения выхода азота из воздуха и выхлопных газов их перед пропусканием через электрогидравлическую дробилку подают в камеру воздушного разрядника [70]. Несвязавшийся азот повторно направляют из дробилки в камеру воздушного разрядника.

Устройство монтируется на тракторе. При движении трактора специальное приспособление подает почву на транспортер, по которому она направляется в электрогидравлическую дробилку. Одновременно туда же подается вода, используемая для полива. Через дробилку продувают воздух, выхлопные газы или газообразный азот. После электрогидравлической обработки удобренная почва в виде пульпы поступает в разбрасыватель-дозатор для равномерного распределения ее по полю.

Увеличить выход полезных соединений в электрогидравлически обрабатываемой почве можно также за счет добавления в нее перед обработкой простейших катализаторов, например хлорного железа и сорбентов типа местных почв, глин, песков, торфа [83]. Так, введение на 1 т почвы всего лишь 20 г хлорного железа повышает выход растворимых солей более чем в 10 раз; введение на 1 т почвы 2 л водной вытяжки торфа дает резкое увеличение выхода в раствор соединений, содержащих ряд ценных микроэлементов. Обычная электрогидравлическая обработка почвы дала выход калия до 30 г на 1 т обрабатываемой почвы, а добавление в качестве катализатора торфяной воды в указанной выше пропорции увеличило его выход до 60 г на 1 т почвы. Выход титана увеличился с 1,0 до 20 г, цезия — с 0,7 до 6 г и т. д.

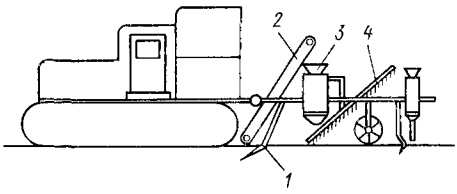


Рис. 7.1. Устройство для электрогидравлической обработки почвы:
1 — приспособление для забора почвы; *2* — транспортер; *3* — электрогидравлическая дробилка; *4* — разбрасыватель

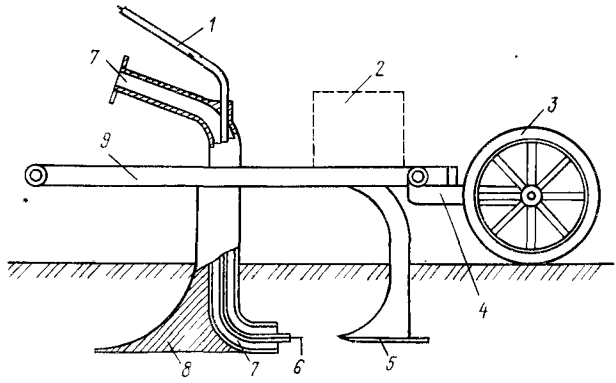


Рис. 7.2. Электрогидравлический плуг для сухой почвы: *1* — токопровод; *2* — высевающее или посадочное устройство; *3* — опорные колеса, *4* — кронштейн для подъема колеса; *5* — пластина заднего ножа (отрицательный полюс тока); *6* — положительный полюс тока; *7* — трубопровод для подачи воды или жидкого удобрения; *8* — передний нож, *9* — плужная рама

Оказалось, что для резкого увеличения содержания высвобождаемого из почвы и воздуха азота после электрогидравлической обработки почву целесообразно засевать штаммами различных нитрифицирующих и аммонифицирующих бактерий [77], используя возможности «бактериального взрыва».

В целях минимизации объема электрогидравлической обработки почвы посев семенами или посадку клубнями, саженцами, рассадой или черенками целесообразно производить в предварительно образованные в почве электрогидравлически обработанные линии или гнезда либо вместе с небольшим количеством предварительно электрогидравлически обработанной почвы в необработанные линии или гнезда, образованные обычными средствами.

Для обработки почвы на больших земельных участках разработаны принципиально новые многоцелевые сельскохозяйственные машины, производящие одновременно предпосевную обработку почвы, удобрение почвы и посев различных сельскохозяйственных культур.

Наиболее ценным качеством почвообрабатывающих электрогидравлических устройств является то, что они не только не оказывают угнетающего действия на глубокие слои почвы (что имеет место при работе на полях мощных тяжеловесных тракторов), но одновременно улучшают структуру почвы, повышают ее плодородие. Различные почвообрабатывающие электрогидравлические устройства разработаны с учетом типа почвы, влажности и климатических условий.

Электрогидравлический плуг для сухой почвы (рис. 7.2) состоит из плужного, поддерживаемого колесами корпуса, на раме

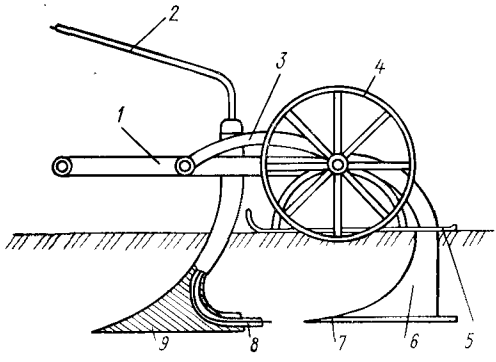


Рис. 7.3. Электрогидравлический плуг для работы в распутицу и при поливном земледелии:
1 — плужная рама; *2* — токопровод; *3* — коленчатая ось; *4* — транспортные колеса; *5* — лыжи; *6* — задний нож; *7* — сошник (отрицательный электрод); *8* — конец кабеля (положительный электрод); *9* — передний нож сошник

которого укреплены одни или несколько последовательно перемещающихся передних и задних ножей [90]. Задние ножи заземляются. В передние ножи встроены изолированные электроды, проходящие через отверстия труб, по которым в почву на разрядный рабочий промежуток подают воду или жидкий удобрительный состав. Электроэнергия по кабелю, вмонтированному в передний нож (ножи), поступает от ГИТ, размещенного на тракторе и питающегося от его силовой установки путем отбора мощности. Концы кабелей, вмонтированные в передние ножи, и острия задних ножей образуют рабочие искровые промежутки. Плоским и узким ножам электрогидравлического плуга почва оказывает весьма небольшое сопротивление при перемещении плуга в процессе обработки почвы, поэтому на перемещение плуга тратится очень небольшая часть энергии трактора.

Работает электрогидравлический плуг следующим образом. При повороте кронштейна поднимаются колеса, а ножи-электроды соответственно заглубляются в почву. По трубопроводу в рабочий промежуток непрерывно поступает вода, а по кабелю от ГИТ к электродам плуга подаются импульсы тока, частота следования которых и их параметры определяются рабочими характеристиками ГИТ. Направляющая пластина заднего ножа-электрода и возможность регулирования высоты подъема опорных колес обеспечивают осуществление электрогидравлических ударов на заданной глубине и устойчивость движения плуга. В результате в заполненной водой полости между передним и задним ножами плуга непрерывно возникают электрогидравлические удары, обрабатывающие почву.

После обработки почвы электрогидравлическим плугом вокруг зоны разряда нижний слой почвы уплотняется, образуя корытообразный лоток для удобренного слоя, а верхний слой почвы с располагающейся в ней корневой системой растений разрыхляется.

Электрогидравлический плуг для распутицы (рис. 7.3) предназначен для обработки почвы в осенний и весенний периоды, когда поля залиты водой и представляют собой «кашу» из воды и почвы, а также для работы на полях при поливном земледелии

[90]. Он представляет собой горизонтальный разрядник, защищенный ножом и безотвальным лемехом от разрушения о грунт. Искровые разряды, возникающие на этом разряднике внутри насыщенного водой грунта на уровне корневой системы растений, интенсивно диспергируют этот слой, рыхлят вышерасположенные слои, не переворачивая их, и эффективно уплотняют слои почвы, расположенные ниже. При этом в окружающей разряд зоне погибают личинки различных сельскохозяйственных вредителей. Дождевые черви, располагающиеся в период распутицы ниже этих слоев, не погибают.

Этот плуг состоит из плужной рамы с закрепленным на ней сошником, несущим передний нож и кабель. Нижний выступающий конец кабеля отогнут назад и образует с задним ножом, также сидящим на плужной раме, рабочий искровой промежуток. Ножи плуга заглубляют в почву и переводят их в транспортное положение поворотом коленчатой оси с сидящими на ней транспортными колесами и лыжами, служащими предохранителями от излишнего заглубления плуга (при работе на затопленном водой поле). При необходимости передний конец сошника в соответствии с технологией обработки почвы снабжается рыхлителем или другой насадкой.

На плуге можно разместить несколько электродов, поскольку сопротивление почвы перемещению электрогидравлического плуга будет во много раз меньше, чем при пахоте обычным плугом.

На раме электрогидравлического плуга также можно расположить посадочные устройства. Более того, каждый такой электрогидравлический плуг рационально снабдить набором специализированных рабочих органов в зависимости от сельскохозяйственной культуры, запланированной под посев на данном поле. Плуг можно использовать и на лесопосадках.

Применение описываемого электрогидравлического устройства позволит решить одну из актуальных проблем земледелия — включить в общий сельскохозяйственный цикл не используемые сезоны весенней и осенней распутицы, что особенно важно в условиях Нечерноземья.

Для обработки каштановых почв сухих степей, песчаных и супесчаных почв, где залогом высокого урожая является создание влагозадерживающего горизонта в корнеобитаемом слое, может быть использовано устройство (рис. 7.4), представляющее собой своеобразное соединение в один агрегат электрогидравлических дробилки и вибратора [91]. Это позволяет использовать энергию каждого электрогидравлического удара не только для обработки почвы путем пропускания ее через электрогидравлическую дробилку, но и для сообщения движения поршню электрогидравлического вибратора, обеспечивающего уплотнение подпочвенного слоя. С этой целью дробилка конструктивно связана с поршнем, шток которого оканчивается плитой, движущейся под почвой. Чтобы исключить попадание почвы из дробилки на поверхности трения

поршня, он выполнен заодно с сетчатым (калиброванным) дном дробилки и связан с ее корпусом эластичными муфтами.

Материал, загруженный в бункер, разрушается электрогидравлическими ударами при прохождении через дробилку. Под действием электрогидравлических ударов нерастворимые химические соединения почвы переходят в растворимые, почва становится более плодородной, удобренной. Одновременно электрогидравлические удары толкают поршень электрогидравлического вибратора вниз и он через шток передает их усилия виброплите, которая интенсивно уплотняет почву, создавая корытообразный уплотненный недренирующий подпочвенный слой. Корытообразный поперечный профиль этого слоя образуется благодаря специально изогнутому поперечному профилю виброплиты. В этом «корыте» будет задерживаться вода, ранее просачивающаяся в нижние слои почвы.

Из выходного бункера дробилки раздробленный материал в виде густой пульпы проходит по трубопроводу, расположенному в теле штока поршня и виброплиты, выбрасывается назад по ходу движения устройства в разрез почвы за виброплитой и заполняет пустоты, возникающие после прохождения виброплиты, образуя поверх уплотненного корытообразного слоя почвы удобренный, измельченный и гигроскопичный слой. Верхние над ним слои почвы разрыхляются колебаниями виброплиты либо обычным способом (например, от рыхлителя, установленного перед вибратором). Для

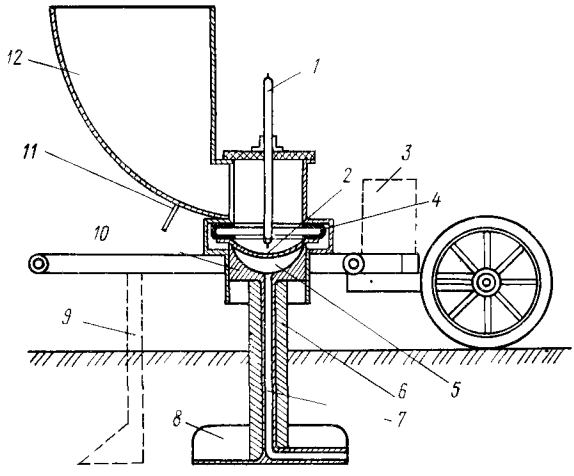


Рис. 7.4. Электрогидравлический плуг с вибратором: *1* — положительный электрод; *2* — дно дробилки отрицательный электрод; *3* высевное или посадочное устройство; *4* уплотнительная муфта; *5* выходной бункер дробилки; *6* нож-обтекатель; *7* — шток поршня вибратора; *8* виброплита; *9* сошник-рыхлитель; *10* — цилиндр поршня; *11* подача воды; *12* загрузочный бункер

уменьшения сопротивления почвы трубчатый шток поршня вибратора снабжен ножом-обтекателем, разрезающим почву при движении устройства.

На несущей раме устройства может быть размещено несколько систем, включающих электрогидравлическую дробилку, вибратор и виброплиты, благодаря чему устройство становится широкозахватным. Питание обеспечивается от силовой установки, размещенной на тракторе. При этом каждая электрогидравлическая дробилка питается от самостоятельного контура.

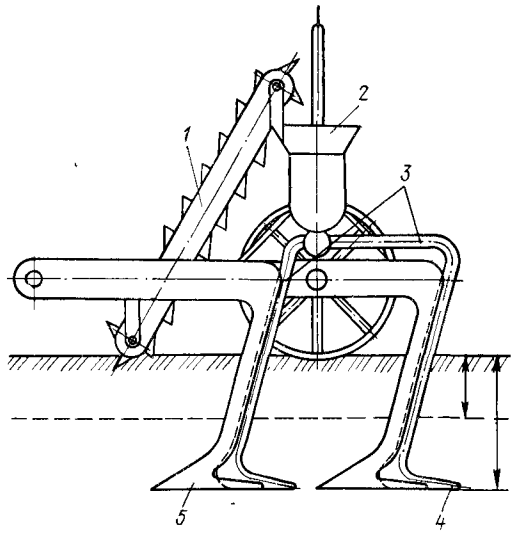


Рис. 7.5. Электрогидравлическое устройство для создания подпочвенного влагозадерживающего горизонта:
1 - элеватор, *2* — электрогидравлическая дробилка; *3* — трубопровод; *4* — сопло трубопровода; *5* безотвальный плуг

Использование этого электрогидравлического устройства рационально совмещать с посевом, посадкой или даже уборкой различных культур (совмещая в последнем случае уборку с посадкой культуры следующего сезона). Применять устройства можно для всех видов культур, особенно в засушливых зонах страны, а также для лесопосадок.

Создание под пахотным горизонтом влагозадерживающего слоя может быть также обеспечено электрогидравлической обработкой [95]. Для этого при отвальной или безотвальной вспашке, которую производят на глубину, бóльшую общепринятой в тех или иных почвенно-климатических условиях, на уровне среза почвы создают тонкие ленточные слои, смыкающиеся в сплошной слой, из почвы или почвенно торфяной смеси, предварительно прошедшей электрогидравлическую обработку.

Поскольку электрогидравлически обработанная почва или горф, измельчаясь, приобретают чрезвычайно высокую гигроскопичность, то созданный из них слой накапливает в себе большое количество влаги. Кроме того, этот слой является дополнительным источником минерального питания для растений. Важно еще и то, что органические волокна при электрогидравлической обработке расщепляются преимущественно по длине и поэтому являются отличной органической арматурой, предотвращающей размывание и вынос почвы.

Устройство, реализующее описанный выше способ создания подпочвенного влагозадерживающего горизонта (рис. 7.5), со-

стоит из агрегата, обеспечивающего электрогидравлическую обработку почвы, торфа или их смеси (например, электрогидравлической дробилки), соединенного трубопроводами с соплами, которые устанавливают позади каждого рабочего органа отвального или безотвального плуга (ширина выхода из сопел не должна быть больше захвата плуга).

При движении плуга по полю происходят подрезание пласта, подъем и рыхление его ножом безотвального плуга или поворот лемехом отвального плуга и введение ленточного слоя электрогидравлически обработанной почвы или почво-торфяной смеси из подающих сопел в образующуюся за ножом плуга прорезь. При размещении лемехов или ножей на раме плуга таким образом, чтобы следы их соприкасались, образуются ленточные слои, которые также соприкасаются и создают в совокупности сплошной подпочвенный влагозадерживающий горизонт. Электрогидравлически обработанную смесь наиболее целесообразно получать непосредственно во время движения устройства по полю с помощью небольшого элеватора, забирающего верхний слой почвы в электрогидравлическую дробилку, куда подаются при необходимости торф и другие добавки.

7.2. Электрогидравлические устройства для производства мелиоративных работ

Электрогидравлические устройства можно широко использовать при проведении мелиоративных работ: для прокладки подпочвенных трубопроводов для дренажа, подпочвенного орошения или подкормки растений жидкими удобрениями, транспортировки различных жидкостей, а также для прокладки подпочвенных высоковольтных кабелей. Применение электрогидравлических устройств позволяет исключить из технологии проведения мелиоративных работ операцию рытья траншей, при которой повреждается верхний плодородный гумусный слой почвы, значительно сократить тяговые усилия трактора на подпочвенное протаскивание ножей и дренеров, а также исключить необходимость в изготовлении, транспортировании и укладке готовых дренажных трубок, транспортных труб или кабелей.

Электрогидравлический кротователь содержит сварную раму, прицепляемую или навешенную на трактор с жестко укрепленными на ней двумя ножами (рис. 7.6). В передний нож вмонтированы трубопровод для подачи бетонного раствора и высоковольтный кабель положительного электрода. В нижней части ножа трубопровод и кабель изгибаются по ходу дренажера, на конце его образуя концентрическое отверстие, из которого выступает центральная жила кабеля, образуя положительный электрод рабочего искрового промежутка. Задний нож имеет выступающий вперед конец, служащий отрицательным электродом. Позади ножа на тросе прикреплен цилиндрический «крот» [94].

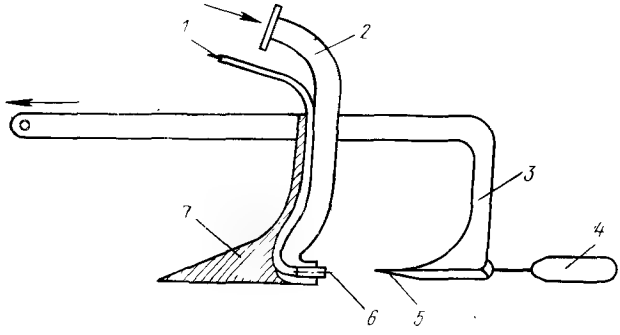


Рис. 7.6. Электрогидравлическое устройство для прокладки подпочвенных дренажных трубопроводов:
1 – кабель — токопровод положительного электрода, *2* – трубопровод для подачи раствора; *3* – задний нож; *4* – выглаживающий «крот», *5* – полюс тока отрицательного электрода, *6* – полюс тока положительного электрода, *7* – передний нож

Устройство работает следующим образом. На территории осушаемого участка, в точке, откуда начинается будущий дренажный трубопровод, на заданную глубину вырывается углубление, в которое помещают ножи электрогидравлического крота. Затем при движении трактора и подаче импульсов тока на рабочий искровой промежуток включается подача бетонного раствора и ножи устройства входят в грунт. Под действием электрогидравлических ударов происходит интенсивное перемешивание бетонного раствора с окружающим грунтом, дающее в итоге пористый почвобетон. Поры в нем образуются постепенно, за счет разложения растительных остатков, попадающих в бетон при смешивании его с грунтом, и выщелачивания водным раствором органических составляющих грунта. Армирующие добавки вводятся в бетонный раствор при его приготовлении, перед загрузкой в бункер, связанный с трубопроводом, и при перемешивании электрогидравлическими ударами равномерно распределяются по всей образующейся массе тощего почвобетона.

Масса почвобетона имеет наибольшее массовое содержание цемента в середине полости и меньшее, плавно переходящее в грунт, по наружной поверхности дренажного трубопровода. Под действием электрогидравлических ударов грунт интенсивно раздвигается в стороны от линии разряда и уплотняется. В грунте образуется как бы трубка, заполненная жидкой массой почвобетона, в которую практически без трения входят задний нож и следующий за ним крот-дренер. Последний, входя в полужидкую массу, заполняющую трубку, отжимает ее к стенкам и уплотняет, выглаживая стенки образующейся бетонной трубки.

Дренажная трубка может иметь различную толщину, регулируемую как количеством подаваемого в рабочий промежуток цементного раствора, так и энергией электрогидравлических ударов

на единицу длины трубки. При армировании штапелем стекловолокна или очесами можно создать трубы, пригодные для транспортирования воды для почвенного орошения или питания полей жидкими удобрениями [93].

Для контроля за качеством создаваемого трубопровода и ликвидации изъянов в формировании труб к основному рабочему органу можно подсоединить дополнительный рабочий орган, ликвидирующий эти изъяны [100]. С этой целью в основном и дополнительном рабочих органах устанавливают пневматические датчики давления, сигнализирующие об обнаруженных изъянах и связанные с блоками управления подачей бетонной смеси. Подача вяжущего и фильтрующего материалов может быть совмещена в полом электрогидравлическом кротователе [99, 100].

Если необходимо увеличить пористость труб, создать трубы с высокой водопроницаемостью стенок, в устройство вводится второй крот, следующий за первым. А в зону прокладки трубопровода, в промежуток между двумя последовательно связанными кротами-дренерами, подают сжатый воздух, который, стремясь найти выход, прорывается сквозь стенки еще не затвердевшей грунтобетонной трубы, образуя в ней многочисленные поры, причем поры имеют характерную конусную форму, благоприятную для самоочищения поступающей в дрену водой [110].

Если кроту-дренажеру придать соответствующую форму, то этим можно обеспечить такую форму дренажных труб, при которой контур нижней половины поперечного сечения дренажной трубы образуется в результате пересечения выпуклых участков двух гипербол с круглым сводом трубы вдоль горизонтальной оси, что обеспечит ее наименьшую засоряемость механическими осадками [105].

Для создания прочных и водонепроницаемых труб, необходимых для транспортировки жидких продуктов, можно предусмотреть еще один крот, а раствор для бетона подавать дважды: сначала подать в рабочий промежуток жидкий раствор с малым содержанием цемента (что обеспечит формирование первоначальной толщины стенок трубы), а затем в полость, расположенную непосредственно перед вторым кротом, более густой раствор с большим содержанием цемента (что обеспечит плотность и прочность внутренней поверхности трубы). Для тех же целей в устройстве можно предусмотреть еще один крот и перед ним осуществить подачу жидкого пластификатора или бензилцеллюлозной массы с пластификатором (например, через обод второго крота), а затем внутреннюю поверхность стенок трубы выгладить третьим кротом. Для лучшей полимеризации и схватывания со стенками трубы массу целесообразно подогревать до температуры 40 50 °С и наносить на стенки трубы, например путем разбрызгивания. Выполненные по этой технологии трубы будут не только водо-, но и газонепроницаемыми и могут найти применение для подачи воды, жидких удобрений, газа и др. [110].

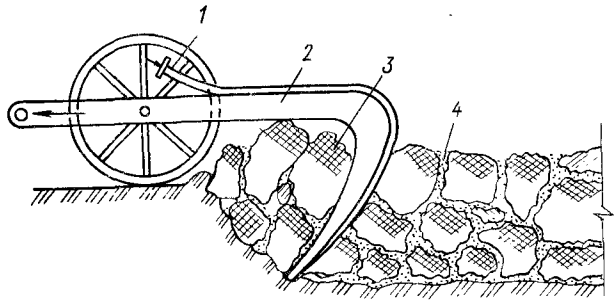


Рис. 7.7. Рыхлитель для окультуривания глинистых почв:
1 – трубопровод для подачи дренирующего материала; *2* – рама рыхлителя; *3* – глинистые глыбы; *4* – трещины, заполненные дренирующим материалом

На рис. 7.7 изображен электрогидравлический рыхлитель для окультуривания глинистых почв [101]. Дренирующим материалом служит водная смесь песка и электрогидравлически обработанного торфа. В электрогидравлической дробилке песчаного типа (на рисунке не показана) производится электрогидравлическая обработка торфа, затем обработанная торфяная пульпа поступает в смеситель, где соединяется с песком в пропорции 2 : 1 и затем по трубопроводу, укрепленному на раме рыхлителя, подается в грунт. После прохода рыхлителя по грунту образуются отдельные глинистые глыбы, которые, оседая под действием собственного веса, вытесняют вверх по трещинам подаваемый дренирующий материал.

Электрогидравлические устройства можно использовать и для мульчирования остатков растительного происхождения с последующим нанесением полученной в результате электрогидравлической обработки гомогенной дисперсной массы на исходную поверхность почвы с целью улучшения ее структуры и эффективной защиты почвы от ветровой эрозии. Почва при этом покрывается тонким слоем измельченных волокон, закрепляющих грунт. Склеивающим веществом является белок, выделяющийся в результате электрогидравлической обработки из стеблей и семян сорных растений. Налипшая на почву и плотно соединенная с ней сетка из волокон растений предотвращает ветровую эрозию, не препятствуя прорастанию семян растений, а ее постепенное разрушение под действием бактерий способствует повышению плодородия почвы [102].

7.3. Электрогидравлические устройства для прокладки высоковольтных кабелей

Подпочвенные высоковольтные электрические кабели можно прокладывать без рытья траншей, формируя их непосредственно в грунте при помощи специальных электрогидравлических

устройств. При этом центральную проводящую жилу кабеля, закрепляемую на плотной (например, картонной) ленте, непрерывно подают в образованную электрогидравлическим устройством кротовую или бетонированную дрену, заполняемую одновременно каким-либо жидким диэлектриком, например нагретым битумом. В том случае, когда кабель укладывается в бетонированную электрогидравлическим способом дрену, заполнение битумом происходит непосредственно, а при укладывании кабеля в уплотненную кротовую дрену лента с закрепленной на ней центральной жилой и битум предварительно заключаются в гибкую (например, полиэтиленовую) трубку с диаметром, равным ширине ленты. Кабели могут укладываться и группами, одновременно по несколько штук.

Устройство для изготовления и прокладки подпочвенных высоковольтных кабелей (рис. 7.8) представляет собой платформу, к днищу которой прикреплен нож с дренопрокладчиком — сквозной полостью, выполненной в виде трех труб, входные концы которых выведены на платформу, а выходные — в зону дренопрокладчика соосно с образуемой электрогидравлическим способом

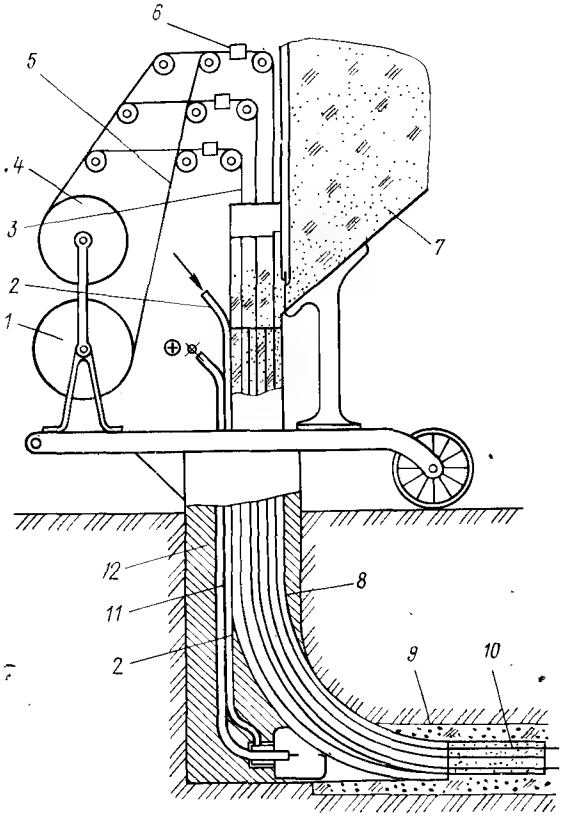


Рис. 7.8. Электрогидравлическое устройство для изготовления и прокладки подпочвенного высоковольтного кабеля в бетонной оболочке:
1 — барабан с трехслойной картонной лентой; *2* — трубопровод для подачи бетона; *3* — проводящая жила; *4* — барабан с тремя кабельными жилами, *5* — перфорированная картонная лента, *6* — устройство крепления жилы к ленте; *7* — бункер с битумом, *8* — сквозная направляющая полость, *9* — бетонная оболочка, *10* — дрена; *11* — положительный электрод, *12* — нож

дреной. В полости ножа размещены также рабочий электрод и трубопровод для подачи бетона. По оси формирующей полости на платформе расположены последовательно устройство формирования защитной оболочки кабеля и центровка проводящей жилы, а также загрузочное приспособление бункер, из которого подается диэлектрик. Устройство центровки выполнено в виде механизма подачи твердой картонной перфорированной ленты шириной, равной внутреннему диаметру дрены, в средней части которой прикреплена проводящая жила.

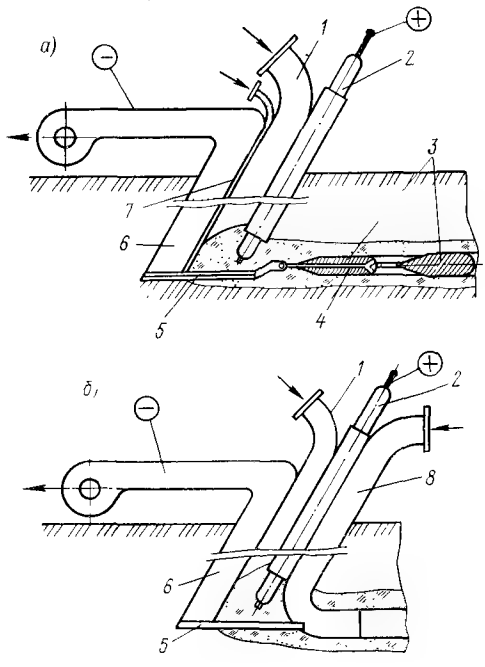


Рис. 7.9. Универсальный рабочий орган электрогидравлического устройства: *а* — для создания кротовых дрен; *б* — для изготовления подпочвенного высоковольтного кабеля:
1 — трубопровод для подачи воды или бетонного раствора; *2* — изолированный положительный электрод; *3* — дренеры; *4* — канал для подачи сжатого воздуха; *5* — отрицательный электрод; *6* — нож-стойка; *7* — трубопровод для подачи сжатого воздуха; *8* — трубопровод для подачи компонентов кабеля

Работа устройства происходит следующим образом. В каждую из труб с барабанов непрерывно и синхронно сматываются материалы, составляющие кабель, — проводящие жилы и картонные перфорированные ленты, на которые крепятся жилы, а из бункера подается подогретый битум. При движении устройства нож разрезает почву и за счет электрогидравлических ударов, возникающих на рабочем искровом промежутке, при подаче бетона образуется бетонированная дрена, в которую непрерывно и поступают все компоненты кабеля.

Образование кабеля и его укладка происходят синхронно с передвижением всего устройства. При этом сплошность грунта при прокладке подобного кабеля ничем не нарушается, и поэтому обычные для традиционных способов просадки грунта в данном случае практически отсутствуют, что полностью исключает возможность деформации грунта и кабеля. Бетонная оболочка кабеля надежно предохраняет кабель от повреждений и делает его весьма долговечным.

Описанные устройства позволяют решить очень важную задачу электрификации сельского хозяйства простыми в изготовлении и

эксплуатации и дешевыми средствами. Экспериментально получен и испытан под напряжением 60 000 В образец кабеля диаметром 30 мм, заполненный низкосортным битумом. При этом себестоимость 1 м кабеля по расчетам снизилась в десятки раз против стоимости обычного кабеля.

В целях унификации изготовления, универсальности использования и упрощения эксплуатации предложен рабочий орган электрогидравлического устройства, основные варианты которого предназначены как для комбинированной обработки почвы, совмещающей рыхление и удобрение, так и для образования кротовых дрен, а также бетонных трубопроводов (рис. 7.9, *а*) и изготовления подпочвенных высоковольтных кабелей (рис. 7.9, *б*).

В универсальном рабочем органе электроды выполнены прямыми, положительный электрод укреплен вертикально и отделен от ножа трубопроводом для подачи рабочей жидкости, а отрицательным электродом служит стержень, горизонтально укрепленный в нижней части ножа. Такая конструкция рабочего органа позволяет с небольшими изменениями использовать его в разных целях, унифицировать производство основных составных частей и при необходимости производить быструю замену электродов.

7.4. Электрогидравлические устройства для орошения

Устройство для орошения [84] состоит из трубопровода с размещенными по всей длине отверстиями-форсунками. Трубопровод, в свою очередь, состоит из отрезков определенной длины, соединенных коленами. На одном конце каждого отрезка трубопровода находится электрогидравлическое устройство, создающее ударную продольную волну с помощью электрогидравлического удара, а на другом — плоский отражатель ударной волны. Вода в трубопровод подается под очень небольшим давлением, так, чтобы из форсунок били небольшие (высотой 10—20 см) фонтанчики. Одновременно в трубах на электрогидравлических устройствах осуществляют периодические (несколько раз в секунду) электрогидравлические удары. Электрогидравлические удары создают ударную волну. Ударная волна идет по трубопроводу, как по волноводу (практически без потерь) и тратит свою энергию в основном на то, чтобы на выходе из трубопровода в каждое отверстие форсунку ответвить часть своей энергии. Если из отверстия форсунки бьет струя, ответвленная часть волны входит в струю и доходит до того места, где струя распадается на капли. Здесь энергия ответвленной волны полностью расходуется на превращение всей верхушки струи в дисперсную пыль (рис. 7.10).

Электрогидравлическое устройство резко снижает расход воды и повышает качество полива. Кроме того, при его использовании можно осуществить полив сельскохозяйственных культур горько-солеными водами [103], так как мелкодисперсная водяная пыль, испаряясь наподобие росы, насытит пресными водами приземные

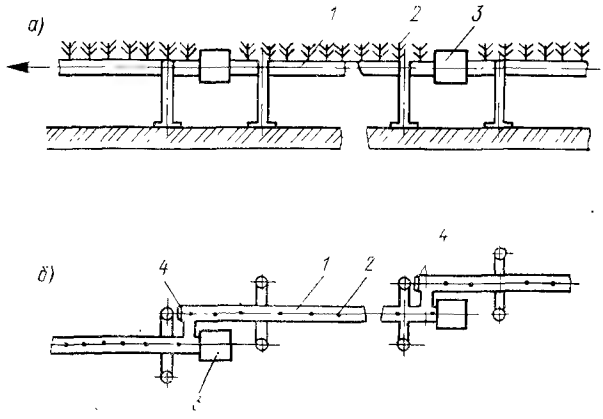


Рис. 7.10. Электрогидравлическое устройство для орошения: *а*, *б* — виды сбоку и сверху; *1* — трубопровод; *2* — отверстия-форсунки; *3* — устройство, создающее продольную ударную волну; *4* — плоский отражатель ударной волны

слои атмосферы, а в выброшенных форсунками более крупных капельках образуется концентрированный рассол, который можно направить по заданному руслу.

Этот же принцип может быть применен в химической промышленности в градирнях, охладителях и т. д.

7.5. Электрогидравлические устройства для очистки, обеззараживания и утилизации животноводческих стоков

Основываясь на общих принципах электрогидравлической очистки и обеззараживания жидкостей и жидких субстратов, можно успешно решить и проблему очистки и обеззараживания жидких животноводческих стоков [51, 52, 104]. При конструировании таких устройств необходимо учитывать, что на эффективность электрогидравлической обработки стоков в значительной мере влияет их электропроводность, определяющая величину рабочего промежутка, а следовательно, и зону эффективного воздействия электрогидравлического эффекта.

Снижение энергозатрат при обработке жидких субстратов может быть достигнуто за счет увеличения длины искры путем инициирования канала разряда лучом лазера или другого проникающего источника излучения (например, радиоактивного) [63] или же с помощью теплового взрыва ВТЭ, а также осуществлением электрогидравлических ударов в воде и передачей их воздействия на высокопроводящий субстрат через эластичную оболочку, окружающую электроды.

В описанном ниже электрогидравлическом устройстве для приготовления торфонавозного удобрения проблема уменьшения по-

терь на проводимость решается за счет предварительного внесения в подлежащие электрогидравлической обработке навозные стоки фрезерного торфа и уже последующей их совместной обработки [109].

Работы по обеззараживанию животноводческих стоков проводились в свинооткормочном комбинате «Новый свет» Ленинградской области. Полученные результаты показали перспективность использования электрогидравлического эффекта для обеззараживания и дегельминтизации животноводческих стоков с целью их дальнейшей утилизации и послужили основанием для создания установки для производства торфонавозного удобрения.

Установка имеет две технологические линии: подготовки исходных компонентов и приготовления комплексного органического удобрения, состав которого 1 : 3 (торф : навоз). Линия подготовки исходных компонентов содержит навозоприемник, снабженный устройством для перемещения навоза, насос для подачи навоза в смеситель с устройством для измельчения остатков корма, содержащихся в навозе. Кроме того, в нее входят элементы для подготовки и транспортировки в смеситель торфа: приемный бункер, вибросито, транспортер, механическая дробилка и магнитный сепаратор. Линия приготовления комплексного органического удобрения содержит смеситель, электрогидравлическую дробилку, соединенную трубопроводами со смесителем и другими элементами линии, блок питания (ГИТ), накопительную емкость для хранения промежуточного продукта и емкость для хранения готового продукта.

Работа устройства протекает следующим образом. Предварительно подготовленные на линии исходных компонентов жидкий навоз (в том числе получаемый гидросмывом) и фрезерный торф поступают в смесительный реактор, соединенный с электрогидравлической дробилкой, где циркулируют по цепочке смеситель — электрогидравлическая дробилка — смеситель. Этим осуществляется гомогенизация исходных компонентов, затем полученный продукт насосом перекачивается в накопительную емкость. В схеме предусмотрена возможность прямой выдачи продукта для дальнейшего его использования или последующей электрогидравлической обработки при циркуляции по цепочке накопительная емкость — электрогидравлическая дробилка — емкость. Продолжительность циркуляции определяется заданным числом электрогидравлических ударов на единицу объема обрабатываемого продукта (около 10^9 импульсов на 1 $м^3$ продукта). После завершения обработки готовый продукт поступает в хранилище. Управление установкой автоматизировано и осуществляется оператором с пульта управления.

Установка позволяет получать качественное, полностью обеззараженное, гомогенизированное и дезодорированное органическое удобрение. Расход электроэнергии на приготовление 1 $м^3$ торфонавозной смеси составляет 50 55 кВт·ч.

7.6. Электрогидравлические устройства для производства торфяной пульпы и обогащения торфа

В настоящее время особое значение приобретает электрогидравлическая обработка торфа. Торф содержит комплекс органических веществ и является уникальным сырьем для различных отраслей народного хозяйства. Органическое вещество торфа и входящие в него гуминовые кислоты в значительной степени определяют плодородие почв, являясь источниками физиологически активных веществ, повышающих процессы жизнедеятельности живых организмов. Однако эти свойства проявляются только после соответствующих процессов разложения органического торфа и перехода ряда его соединений в доступное для усвоения растениями состояние. В природе этот процесс идет крайне медленно, поэтому применение торфа в чистом виде эффективно лишь при чрезвычайно высоких дозах его внесения в почву, что экономически невыгодно. Для использования торфа в качестве удобрения применяют различные методы активации органического вещества и азота торфа: термические, химические, биологические.

Электрогидравлическая обработка обладает многофакторным физико-химическим воздействием на сложные органические структуры, является перспективным методом его активации [70, 74, 92]. Для этого используют электрогидравлические дробилки, входящие как основной агрегат в технологическую линию.

Последовательность технологических операций при работе электрогидравлической установки следующая: фрезерный торф, находящийся в загрузочном бункере, подается ленточным транспортером на вибросито, где он просеивается, а затем очищается электромагнитным сепаратором от металлических включений. Интенсивность подачи торфа определяется производительностью вибросита и электрогидравлической дробилки. Просеянный торф подается ленточным транспортером в бак смесителя, куда поступает вода в количестве, регулируемом вентильной заслонкой с приводом и определяемом влажностью исходного торфа и заданной консистенцией конечного продукта. Затем торфоводяная смесь поступает в камеру электрогидравлической дробилки, где подвергается воздействию электрогидравлических ударов. Обработанный субстрат-пульпа перекачивается насосом в резервуар.

Все основные технологические операции обработки торфа управляются и контролируются автоматически. Кроме этого, предусмотрены пульт дистанционного управления отдельными операциями, а также сигнализация и контроль за режимами работы. Эта технология легла в основу промышленной установки для электрогидравлической обработки торфа с целью получения из него качественного органического удобрения, массы для дражирования семян различных сельскохозяйственных культур и высокодисперсной торфомассы, которая используется для нанесения на поверхность торфа для предохранения его от выдувания [109].

Электрогидравлически обработанный торф также может быть использован в микробиологической, бродильной и комбикормовой промышленности. В отдельных случаях, например при использовании электрогидравлически обработанного торфа в качестве сырья для бродильной промышленности, после электрогидравлической обработки торф засевают соответствующей микрофлорой, используя при этом эффект «бактериального взрыва» [77, 92].

Исследования, проведенные на пяти видах торфа, показали, что в процессе электрогидравлической обработки торфа происходит его интенсивное диспергирование: содержание в нем частиц размером менее 250 мкм доходит до 80—90 %. При этом наиболее интенсивное диспергирование происходит в первый период электрогидравлической обработки (до 300 импульсов на 1 кг суспензии).

Проведенные эксперименты позволили установить, что массовое содержание питательных веществ и микроэлементов в электрогидравлически обработанном торфе резко изменяется в сравнении с исходным в сторону повышения. Так, массовое содержание аммиачного азота возрастает в зависимости от вида торфа в 1,4—4,5 раза, а водорастворимого органического вещества — в 1,5—5 раз. Физико-химическими анализами определено, что при электрогидравлической обработке происходит гидролитическое дезаминирование свободных кислот.

Экспериментально установлено, что свободное хранение электрогидравлически обработанного торфа при положительных температурах приводит на 10—15-й день хранения к резкому (в 5—10 раз) увеличению массового содержания в нем растворимых соединений азота NH_4 (табл. 7.1) за счет бактериального взрыва. Это свидетельствует о том, что процессы, инициированные электрогидравлическим эффектом, продолжаются еще определенное время и после его прекращения, после чего состояние стабилизируется. Это подтверждается тем, что последующее длительное (3—5 мес) хранение электрогидравлически обработанного торфа как при отрицательных, так и при положительных температурах не ухудшает приобретенных им свойств.

Исследование процессов, протекающих в торфе после электрогидравлической обработки при употреблении его в качестве органического удобрения, выявило два наиболее целесообразных направления его использования, а именно: в качестве добавки к тепличным грунтам и как основного компонента дражировочной массы для дражирования семян корнеплодов и овощных культур.

Производственная проверка в теплицах совхозов «Выборжец» (на площади 4200 м^2) и «Ленинградский» (на площади 13 050 м^2) Ленинградской области показала, что внесение электрогидравлически обработанного торфа в тепличный грунт в количестве 10 кг/м^2 обеспечивает такую же урожайность огурцов, как и при внесении 20 кг/м^2 навоза. Кроме того, внесение электрогидравлически обработанного торфа улучшило фитосанитарное состояние

Таблица 7.1

Увеличение массового содержания растворимых в торфе соединений азота в результате «бактериального взрыва»

Номер месторождения	NH_4^+ на 1 кг сухого торфа						
	До обработки	После электрогидравлической обработки					
		через 3—4 дня		через 14 дней		через 30 дней	
	мг/кг	мг/кг	%	мг/кг	%	мг/кг	%
1	23,4	73,6	314,5	760,0	3247,9	759,0	3243,6
2	17,3	295,2	1706,4	1115,0	6445,1	1020,4	5898,2
3	40,6	83,8	206,4	211,0	519,7	213,0	524,6

Примечание. Исследования выполнены в НИИагропочвоведения БССР в 1965 г.

тепличных грунтов. Экономическая эффективность применения электрогидравлически обработанного торфа по сравнению с навозом составила 416 руб. на 1 га.

Таким образом, использование электрогидравлически обработанного торфа в защищенном грунте позволяет снизить потребность в таком дефицитном материале, как подстилочный навоз, улучшить за счет дезодорирующего эффекта санитарно-гигиенические условия работников теплиц, удешевить производство овощей в теплицах. Кроме того, электрогидравлически обработанная пульпа (смесь воды с торфом) обладает бактерицидными свойствами, что очень важно при выращивании овощей в закрытых грунтах. Также эффективно может применяться в тепличном хозяйстве и электрогидравлическая стерилизация почвы с одновременным ее удобрением.

Большие перспективы имеет также предложенный способ электрогидравлического обогащения торфа, включающий дробление, последовательное отстаивание, сушку и самобрикетирование торфа. Для этого поступающий из месторождения торф подвергается дроблению в обычных или двух-трехступенчатых электрогидравлических дробилках песчаного типа, работающих в непрерывном режиме и выдающих пульпу с частицами не крупнее 1 мм при соотношении торфа и воды не менее чем 1 : 3. Полученная жидкая пульпа поступает в отстойники-транспортеры, из нижней части которых непрерывно удаляется осевший на дно песок. Затем обогащенная торфом пульпа поступает в другие отстойники, по дну которых проходит сетчатая транспортерная лента, разделенная на ячейки. По мере заполнения торфом ячеек лента выносит их из ванны, где теряющие воду брикеты под действием сил поверхностного натяжения воды стягиваются и отрываются от стенок формы. Далее транспортер сбрасывает частично сформированные брикеты на транспортер сушки, где брикеты окончательно подсыхают и стягиваются в очень плотные брикеты с объемной массой до 1,5—2,0.

Оставшаяся обогащенная электрогидравлической обработкой водоторфопесчаная смесь может эффективно использоваться в качестве удобрения. Энергетические затраты на электрогидравлическое дробление и обогащение торфа, по нашим расчетам, не превышают 50—60 кВт на 1 т. Несомненно, эффективна и перевозка обогащенного и брикетированного торфа с объемной массой 1,5—2,0 (по сравнению с обычной не более 1,0). Заметно сокращается и количество золы при сжигании такого уплотненного торфа.

7.7. Электрогидравлические устройства для дражирования семян

Высокая дисперсность, вязкость и клеящая способность, а также хорошие удобрительные свойства и физиологическая активность электрогидравлически обработанного торфа позволили с успехом применить его в качестве основного компонента дражировочной массы. При этом отпала необходимость в использовании синтетических или дефицитных клеящих веществ, упростилась технология дражирования и удешевилась его стоимость (затраты труда на дражирование сократились на 30 %, а стоимость драже — на 19 %).

При внедрении дражирования электрогидравлически обработанным торфом семян корнеплодов и овощных культур в совхозах Ленинградской области прибавка к урожаю составила: моркови — 11,5 % или 35—90 ц/га, свеклы — 10—28 % или 26—73 ц/га. Для широкого внедрения в практику разработана и строится линия для дражирования семян [108]. Работа линии осуществляется следующим образом. Фрезерный торф погрузчиком подается на виброгрохот, где производится отсев крупных включений. Просеянный торф по транспортеру поступает в смеситель, где смешивается в заданной пропорции с водой. Затем суспензия (в определенном объеме) идет на обработку в бункер электрогидравлической дробилки, после которой пульпа направляется в емкость для готового продукта, а оттуда через сито — в распылитель дражиратора.

В качестве второго компонента дражировочной массы, как правило, используют сухой торф, имеющий определенный процент влажности. После обработки в дражираторе (нанесения питательной оболочки) семена поступают в сушилку, а затем в калибратор, в котором осуществляется сортировка дражированных семян по фракциям. Дражирование семян может также производиться формованием удобрительной гранулы с размещением внутри нее семени. Формование осуществляется выдавливанием компонентов гранулы из концентрических трубопроводов, охватывающих семяраспределитель. Гранулу формуют в виде последовательно охватывающих друг друга цилиндрических слоев, а семя вводят в наружный слой. Сформированные драже отсекаются дозирующим отсекателем [107].

Подобным же образом могут формироваться и многокомпонентные гранулы с комплексным запасом питательных элементов, необходимых растениям на всех фазах их развития.

В этом случае удобрения вносятся непосредственно к корням растений (одновременно с посевом) благодаря объединению в единой грануле и семени, и удобрений. Это позволяет освободиться от многоразовых подкормок, а также от предпосевного внесения удобрений. Кроме того, концентрация удобрительных смесей в таких гранулах для каждого семени позволяет резко повысить экономичность внесения удобрений, так как предотвращает их неизбежное рассеивание и потери, имеющие место при традиционных способах.

7.8. Электрогидравлические устройства для дробления органических материалов и приготовления растительных и животных кормов

Такое растительное сырье, как ботва многих сельскохозяйственных растений, водоросли, древесная зелень, содержит много биологически активных веществ, витаминов, фитонцидов, микроэлементов, регулирующих жизненно важные процессы организма, содержит такие энергетические вещества как белки, жиры и углеводы. Однако все эти питательные вещества заключены в прочную, трудноперевариваемую лигниноцеллюлозную оболочку, которая практически не поддается разрушению традиционными механическими способами. Электрогидравлическая обработка разрушает эту оболочку, высвобождая заключенные в ней питательные вещества [79].

В полученном электрогидравлически обработанном кормовом сырье — гомогенате — по общепринятым методикам определялось массовое содержание сырого протеина, сырого жира, сырой клетчатки, растворимого и общего сахара, лигнина и гемицеллюлозы. Биохимическими исследованиями установлено, что при электрогидравлической обработке сырья в нем значительно (в среднем 10—20 %) возрастает содержание сырого жира. Изменяются также и основные показатели углеводного комплекса. Так, на 73 % увеличивается массовое содержание растворимых и редуцирующих сахаров в образцах электрогидравлически обработанной ячменной соломы, а в образцах веточного корма — березы и ивы это увеличение составляет соответственно 23 и 30 %. Структурные изменения корма при электрогидравлической обработке, увеличение в нем массового содержания легкоперевариваемых питательных веществ повышают питательность корма, а также позволяют в дальнейшем использовать полученный субстрат для выращивания дрожжей и непатогенных грибов в микробиологической промышленности.

Для электрогидравлической обработки растительных и животных кормов используют электрогидравлические дробилки, сходные с дробилками для нетокопроводящих материалов. Однако способы

и устройства для дробления и измельчения различных твердых материалов неэффективны при дроблении всякого рода вязких и волокнистых материалов, образующих в воде малоподвижные и трудноперемешиваемые субстраты. Подача в зону дробления новых порций таких материалов становится затруднительной или невозможной, а разрушение происходит лишь в непосредственной близости от разряда. В связи с этим для измельчения различных волокнистых и эластичных материалов разработаны способы, позволяющие осуществлять либо одновременное с дроблением интенсивное перемешивание всего объема, занятого жидким субстратом, либо производить дробление в большем активном объеме, либо комбинацией этих методов получать одно и другое одновременно. Успешно решить эти задачи можно с помощью методов «воздушной кавитации» и «пузырьковой кумуляции».

Один из вариантов устройства для дробления методом «воздушной кавитации» содержит камеру, в которую из трубопровода непрерывно поступают смешанные в заданной пропорции вода и материал, подлежащий измельчению (рис. 7.11). Выводной канал, закрытый сеткой с калиброванными отверстиями, обеспечивает постоянный уровень жидкости в камере. Разряды возникают между электродами вблизи поверхности жидкости, выбрасывая каждый раз некоторую часть жидкости вверх, где она ударяется об отражающую поверхность поворотного препятствия. Обработка в таких камерах, соединенных последовательно, доводит материал до необходимой степени измельчения [5, 43].

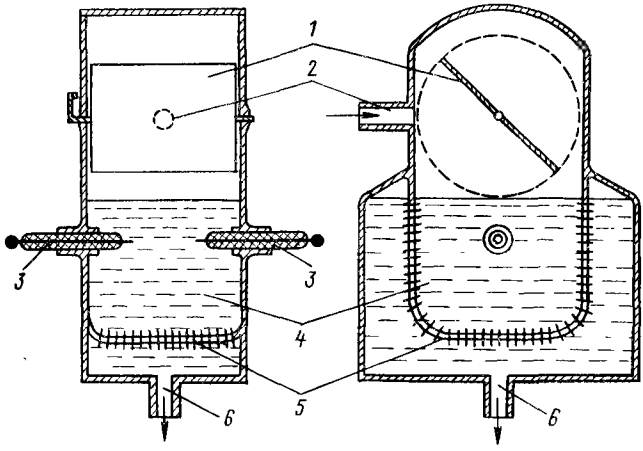


Рис. 7.11. Устройство для дробления методом «воздушной кавитации»:

1 — отражающая поворотная поверхность; *2* — подача материала и жидкости; *3* — электроды; *4* — рабочий объем; *5* — сетка отверстий в днище и стенках рабочей камеры; *6* — отвод переработанного материала

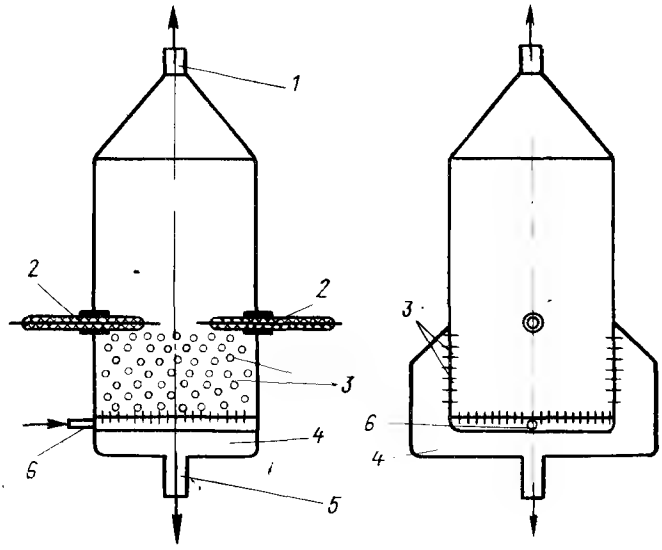


Рис. 7.12. Устройство для дробления методом «пузырьковой кумуляции»:
1 — подача материала и воды; *2* — электроды; *3* — сетка выходных отверстий для обработанного материала; *4* — приемный бункер для обработанного материала; *5* — выводной патрубок; *6* — подвод газа или пара

Устройства для измельчения методом «пузырьковой кумуляции» аналогичны другим электрогидравлическим дробилкам с той лишь разницей, что к имеющемуся в нижней части дробилки выходу, закрытому сеткой с калиброванными отверстиями, подсоединен трубопровод для регулируемой непрерывной подачи газа или пара в объем жидкости, находящейся в дробилке. На рис. 7.12 приведено устройство для измельчения методом «пузырьковой кумуляции» [5, 53].

Технология обработки органического сырья иногда требует циркуляции обрабатываемого материала. Это осуществляется с помощью загрузочного бункера и насоса. Исходный материал загружается в бункер, затем насосом подается в электрогидравлическую дробилку и циркулирует по цепочке: бункер — электрогидравлическая дробилка — бункер. Продолжительность циркуляции определяется заданным числом электрогидравлических ударов на единицу объема продукции.

Была предложена еще одна технология приготовления полноценного корма из грубого растительного сырья [79]. Растительные продукты, обычно не употребляемые в пищу (водоросли, грубые травы, колючки, ветки, корневища деревьев и трав, хвоя, листья древесных пород), измельчают до кусков длиной 3–5 см, пропускают через электрогидравлические дробилки песчаного типа с диаметром выходных отверстий 3—5 мм. Для более тонкого

помола и усиления бактерицидных свойств собирают последовательную цепочку из двух-трех дробилок, калиброванные отверстия днищ которых уменьшаются от дробилки к дробилке (начиная с 5—8 и до 1—3 мм).

Чтобы выделить клетчатку, пасту, выходящую из дробилок, пропускают через сито, которое отбирает волокна клетчатки заданной крупности. Оставшийся раствор обрабатывают обычными средствами для осаждения белков. Клетчатку и выделенные белки формируют, высушивают и хранят в виде брикетов, гранул, муки. Корм, приготовленный таким образом, полностью обеззараживается и может длительно храниться, не разлагаясь и не теряя своих питательных свойств.

Опытным путем определены режимы электрогидравлической обработки грубого растительного сырья, при которых происходит максимальное извлечение питательных веществ из растительной клетки. Наиболее эффективно электрогидравлическая обработка протекает при следующих параметрах: $C=0{,}1$ мкФ; $U=50$ кВ; $l=25$ мм; микромодуль 1 : 2; 1 : 3; температура во время обработки не более $+50$ °С.

Результаты исследований послужили основанием для проведения опыта по изучению влияния длительного кормления молочных коров, в рацион которых входила паста электрогидравлически обработанных веток березы и ивы. Опыты проводились по методике групп с уравнительными периодами. Как показал опыт, животные, получавшие электрогидравлически обработанный корм, имели общее физиологическое состояние на уровне контрольных, а молочная продуктивность их была на 11—12 % выше контрольной группы. Опытным путем также было установлено, что эффективность электрогидравлической обработки некоторых видов растительного сырья значительно повышается, если полость электрогидравлической дробилки непрерывно вакуумировать, а жидкий субстрат, содержащий клеточную ткань, вакуумировать перед электрогидравлической обработкой [81]. Это вызвано тем, что растительные клетки имеют высокую эластичность из-за наличия в них либо газовых вакуолей, либо малых пузырьков газа, растворенных в протоплазме. Эти пузырьки срабатывают как эластичные газовые демпферы при каждом электрогидравлическом ударе и защищают клетку от разрушительного действия сверхвысоких давлений. Закрытые оболочкой клетки от соединения друг с другом и всплывания пузырьки резко снижают интенсивность электрогидравлического дробления жидких субстратов, содержащих растительные и животные ткани. В частности, именно по этой причине при электрогидравлическом дроблении почти не разрушаются клетки хлореллы, а повышение ее питательных качеств непосредственно связано с возможностью их полного разрушения.

Однако достаточно перед электрогидравлической обработкой или во время ее наложить на субстрат, содержащий клеточную

ткань, вакуум, как газовые вакуоли клеток начинают интенсивно расширяться, проходить через отверстия клеточных мембран и всплывать. Газы, растворенные в протоплазме клеток, ведут себя также: интенсивно выделяются из протоплазмы, проходят через клеточные мембраны и всплывают. Если лишенный газов действием вакуума жидкий субстрат, содержащий клетки, подвергнуть действию электрогидравлических ударов, клетки будут интенсивно разрушаться, поскольку демпфирующее действие газовых вакуолей и газовых пузырьков теперь полностью отсутствует. При электрогидравлическом дроблении этого субстрата на основании сильного дегазирующего действия электрогидравлических ударов процесс выделения газов из протоплазмы значительно усилится, а если дробление при этом вести в электрогидравлической дробилке, полость которой непрерывно вакуумируется, то процесс разрушения клеток будет полным.

При дроблении различных органических продуктов содержащиеся в них эластичные волокна и другие труднодробящиеся включения часто забивают калиброванные отверстия днища дробилки, провисая концами в двух соседних отверстиях. Это снижает эффективность работы дробилки, так как для очистки днища необходима ее остановка.

Для предотвращения засорения и обеспечения бесперебойной работы дробилок их выпускные перфорированные днища должны иметь вогнутую форму, а калиброванные отверстия днищ целесообразно выполнять в виде многолучевой звезды или другого вида сообщающихся щелевидных отверстий, сходящихся к центру днища дробилки [106].

Электрогидравлическое дробление животных кормов (мясных боенских отходов и тушек забитых пушных зверей) дает возможность использовать их в качестве полноценного корма для пушных зверей, свиней и птицы. При этом электрогидравлическая обработка помимо обеззараживания обеспечивает гомогенизацию и повышение питательной ценности кормов. Биохимический анализ показал, что содержание сырого протеина в мясных боенских отходах после электрогидравлической обработки не изменяется, а выход сырого жира увеличивается на 15—30 % за счет разрушения полимерных форм жиров и перехода их в формы, легкоусвояемые животными. Кроме того, в процессе обработки происходит измельчение и «окатывание» острых углов костей мясных отходов, что также повышает качество корма и исключает у животных, употребляющих этот корм, случаи ранений желудочно-кишечного тракта.

Электрогидравлическая обработка мясных кормов осуществляется в дробилках, аналогичных дробилкам, используемым для дробления растительных кормов циркуляционного типа. Обработка ведется преимущественно на мягких режимах (микромодуль 1 : 0,75). Боенские отходы и тушки павших животных измельчают, а затем подвергают электрогидравлической обработке до

состояния обеззараженной гомогенной пастообразной массы, пригодной к скармливанию животным как непосредственно в виде пасты, так и в высушенном виде, допускающем длительное хранение.

Как показала эксплуатация опытной электрогидравлической установки в зверосовхозе «Рощинский» Ленинградской области, пушные звери охотно поедали обработанный этим способом корм, хорошо прибавляли в весе. Созревание меха норок ускорилось на 5—7 дней, качество шкурок повысилось на 10 %. Падеж щенков в опытной группе был на 5 % меньше, а количество щенков на самку 5 в опытной группе против 3 в контрольной. Расчеты показали, что экономический эффект от использования электрогидравлического способа обработки корма составляет 4,5 руб. на одну шкурку.

Электрогидравлические дробилки для комплексной обработки и обеззараживания мясных отходов животноводческих ферм, городских пищевых отходов, а также торфа, соломы, хвои, веточного корма и других органических продуктов уже прошли опытную проверку, а в ряде случаев и опытно-промышленную эксплуатацию и имеют большие перспективы широкого промышленного внедрения.

7.9. Электрогидравлические устройства для комплексной обработки сельскохозяйственных продуктов

Многоцелевое электрогидравлическое устройство для использования в сельском хозяйстве (чистки шерсти и других волокнистых материалов, мойки фруктов и овощей, отделения кожицы и семян плодов от мякоти и других аналогичных работ) приведено на рис. 7.13 [75]. Устройство состоит из ванны, заполненной моющей средой (в случае мойки, очистки) или иной рабочей жидкостью (в случае обработки ягод и плодов), и двух ленточно-сетчатых транспортеров (верхнего и нижнего). Транспортеры образуют между собой полость (канал), в которой находится обрабатываемый материал. Рабочая среда входит в ванну через входной штуцер и, проходя в противотоке к обрабатываемому материалу, выходит через выходной штуцер. Несколько пар электродов помещаются под обоими транспортерами. Под электродами устанавливаются отражатели. Количество пар электродов определяется мощностью ГИТ.

Материал, подлежащий обработке, подается на транспортеры и проходит последовательно над искровыми разрядными промежутками. Чередование электрогидравлических ударов происходит так, чтобы в ванне возникала «бегущая волна» (см. рис. 4.12) в направлении выхода обрабатываемого материала. Обработанный материал выносится транспортерами и сбрасывается в бункер-приемник. Размеры ячеек сеток транспортера согласуются с размерами обрабатываемого материала. Электрогидравлическая обработка может вестись как в полностью за-

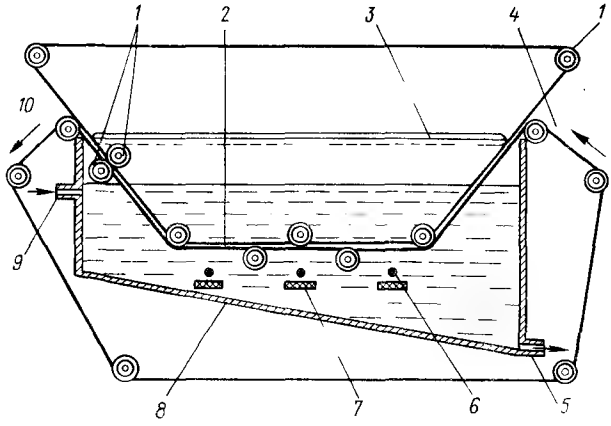


Рис. 7.13. Устройство для комплексной электрогидравлической обработки сельскохозяйственных продуктов:

1 — ролики транспортеров; *2* — рабочий объем между сетками транспортеров, *3* — накладная крышка для работы методом «воздушной кавитации»; *4* — подача исходного материала; *5* — вывод отработанной очистной жидкости или обработанных жидких продуктов; *6* — электроды; *7* — отражатели; *8* — наклонное днище ванны; *9* — ввод рабочей жидкости; *10* — вывод очищенного материала или мезги

полненной рабочей жидкостью ванне, так и при низком уровне жидкости, что позволяет применить метод «воздушной кавитации» (для этого предусмотрена накладная крышка ванны).

Все описанные в этой главе электрогидравлические устройства имеют еще одно очень важное достоинство — универсальность использования. С помощью одной силовой установки и комплекта электрогидравлических устройств различного назначения можно и централизованно, и непосредственно в каждом хозяйстве осуществить взрывание негабаритов, бурение и очистку скважин, погружение и создание свай, дробление и измельчение материалов, приготовление комплексных удобрений, обработку почв, создание дренажных систем, трубопроводов и подпочвенных высоковольтных кабелей, орошение, обеззараживание и очистку жидких субстратов и животноводческих стоков, гомогенизацию молока, приготовление растительных и животных кормов, мойку и очистку различных сельскохозяйственных продуктов и многое другое. Широкое внедрение электрогидравлики во все агропромышленные отрасли позволит эффективно решить многие задачи Продовольственной Программы СССР.

Список литературы

1. **Покровский Г. И., Моралевич Ю. А.** На передний край смелой мечты. М.: Молодая гвардия, 1962. 207 с.

2. **Покровский Г. И., Ямпольский В. А.** Электрогидродинамическая аналогия кумуляций.— Журнал технической физики. Вып. 3, 1946, с. 279—285.

3. **Юткин Л. А.** Перспективы применения электрогидравлической обработки.— В кн.: Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов. М.; Л.: Машиностроение, 1966, с. 249—270.

4. **Юткин Л. А.** Электрогидравлическое дробление. Л.: ЛДНТП, ч. 1, 1959. 36 с.

5. **Юткин Л. А.** Электрогидравлическое дробление. Л.: ЛДНТП, ч. 2, 1960. 49 с.

6. **Юткин Л. А.** Электрогидравлическая обработка металлов. — В кн.: Электроразрядная обработка материалов. Л.: Машиностроение, 1971, с. 197—252.

7. **Юткин Л. А.** Электрогидравлический эффект. М.; Л.: Машгиз, 1955. 52 с.

8. **Юткин Л. А.** Электрогидравлический эффект и его применение в горном деле.— Строительные материалы, изделия и конструкции, 1955, № 9, с. 13—15.

9. **Юткин Л. А.** Электрогидравлический эффект и некоторые возможности его применения. Л.: ЛДНТП, 1959. 16 с.

10. **Früngel F.** Zum mechanismen Wirkungsgrad von Flüssigkeitsfunken, Optic, Hamburg, Band 3, 1948, № 1 2, s. 124—127.

11. **Lane T.** Description of an electrometer invented by mr. Lane with an account of some experiments made by him with it, Pilosophical Transactions, London, Vol. LVII, 1767, p. 451—460.

12. **Priestly J.** Experiments on the Lateral force of electrical explosions, Pilosophical Transactions, London, Vol. LIX, 1769, p. 57—62.

13. **А. с. 37277 (СССР).** Способ и приспособление для дезинфекции и стерилизации с помощью токов высокой частоты И. В. Федоров. Заявл. 17.12.32; Опубл. 30.06.34.

14 **А. с. 105011 (СССР).** Способ получения высоких и сверхвысоких давлений Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 15.04.50, № 416898 Опубл. в Б. И., 1957, № 1.

15. **А. с. 119074 (СССР).** Способ получения сверхвысоких гидравлических давлений и устройств для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 15.04.50, № 606001 25 -27; Опубл. в Б. И., 1966, № 1.

16. **А. с. 142502 (СССР).** Способ получения ударных деформирующих усилий посредством электрогидравлических ударов/ Л. А. Юткин, Л. И Гольцова. — Заявл. 05.06.50, № 419284 25; Опубл. в Б. И., 1961, № 21.

17. **А. с. 129485 (СССР).** Способ получения деформирующих усилий при помощи насоса/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. — Заявл. 11.09.50, № 434366/25; Опубл. в Б. И., 1960, № 12.

18. **А. с. 119403 (СССР).** Электрогидравлический способ подачи и распыла жидких топлив и других жидкостей и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 20.01.51, № 441894/25; Опубл. в Б. И., 1959, № 8.

19. **А. с. 121053 (СССР).** Способ поверхностного воздействия на материалы, Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 22.03.51, № 605989/25; Опубл. в Б. И., 1964, № 18.

20. **А. с. 148724 (СССР).** Способ получения высоких и сверхвысоких давлений/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 22.03.51, № 605993/25; Опубл. в Б. И., 1963, № 3.

21. **А. с. 110525 (СССР).** Способ воздействия на материалы струей высокого и сверхвысокого давления жидкости/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 21.06.51, № 2668/576229; Опубл. в Б. И., 1958, № 1.

22. **А. с. 100876 (СССР).** Способ бурения шпуров и скважин и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 16.01.52, № 9898/450089; Опубл. в Б. И., 1955, № 6.

23. **А. с. 129945 (СССР).** Способ получения высоких и сверхвысоких давлений и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 29.12.52, № 605995/25, Опубл. в Б. И., 1963, № 20.

24. **А. с. 106338 (СССР).** Способ возбуждения упругих волн в толще земной коры при сейсмической разведке/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 13.07.53, № 2721/454782; Опубл. в Б. И., 1957, № 5.

25. **А. с. 334739 (СССР).** Устройство для обработки материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова Заявл. 14.02.55, № 575660/29 33; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

26. **А. с. 90443 (СССР).** Способ использования металлической стружки при обработке металлов резанием/Л. А. Юткин, Л И Гольцова. Заявл. 25.04.49, № 396143; Опубл. в Б. И., 1967, № 2.

27. **А. с. 117562 (СССР).** Способ получения коллоидов металлов и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 10.03.55, № 4421/576655/23; Опубл в Б. И., 1959, № 2.

28. **А. с. 110887 (СССР).** Гидравлический объемный насос/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 17.03.55, № 550495; Опубл. в Б. И., 1958, № 2.

29. **А. с. 113549 (СССР).** Способ обогащения руд и других материалов и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 25.05.55, № 9949/575050; Опубл. в Б. И., 1958, № 6.

30. **А. с. 110179 (СССР).** Способ резания металлов и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И Гольцова. Заявл. 07.06.57, № 576062/6138; Опубл. в Б. И., 1957, № 12.

31. **А. с. 126400 (СССР).** Гидравлический вибратор/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 26.10.55, № 575483/29—33; Опубл в Б. И., 1983, № 18.

32. **А. с. 242695 (СССР).** Способ сообщения реактивного движения плавающим средствам Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 27.10.55, № 8288/576900/27 11; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

33. **А. с. 242696 (СССР).** Движитель для сообщения движения плавающим средствам/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 27.10.55, № 8288/576900/27—11; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

34. **А. с. 147917 (СССР).** Способ восстановления размеров полых деталей машин Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 14.11.55, № 24278/456035/25; Опубл. в Б. И., 1962, № 11.

35. **А. с. 107557 (СССР).** Гидравлический насос/Л. А. Юткин, В. С. Берсенев.— Заявл. 12.12.56, № 562424; Опубл. в Б. И., 1957, № 7.

36. **А. с. 341098 (СССР).** Конденсатор для работы в цепях с короткими импульсами большой амплитуды/Л. А Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 12.02.57, № 566800/26-25; Опубл. в Б И, 1972, № 18.

37. **А. с. 123500 (СССР).** Способ взрывания горных пород и других материалов и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл 04.03.57, № 571747/22; Опубл в Б. И., 1959, № 21.

38. **А. с. 110688 (СССР).** Способ выделения германия из угля в жидкой среде Л. А. Юткин, А. Н. Мельникова, Ф. Я. Сапрыкин.— Заявл. 07.05.57, № 572368; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

39. **А. с. 120113 (СССР).** Устройство для разрезания материала посредством электрогидравлического удара/Л. А. Юткин, Ю. В. Журавский,

М. Г. Рейфисов.— Заявл. 15.05.57, № 573048; Опубл. в Б. И., 1959, № 10.

40. **А. с. 114172 (СССР).** Способ очистки проката от окалины/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 12.11.57, № 586042; Опубл. в Б. И., 1958, № 7.

41. **А. с. 118436 (СССР).** Электрогидравлический бур для бурения скважин Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 12.11.57, № 586039/22; Опубл. в Б. И., 1959, № 5.

42. **А. с. 123911 (СССР).** Способ разрушения горных пород и других материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 12.11.57, № 586041/22; Опубл. в Б. И., 1959, № 22.

43. **А. с. 567351 (СССР).** Устройство для измельчения, перемешивания и эмульгирования материалов или очистки изделий при помощи электрогидравлических ударов Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 18.11.57, № 586371/03; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

44. **А. с. 120884 (СССР).** Способ непрерывного извлечения жиров и масел из растительных и животных тканей и устройство для осуществления способа Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 06.12.57, № 587400/28; Опубл. в Б. И., 1959, № 13.

45. **А. с. 128000 (СССР).** Способ эмульгирования и деэмульгирования веществ/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 06.12.57, № 587405/23; Опубл. в Б. И., 1960, № 9.

46. **А. с. 153827 (СССР).** Устройство для очистки поверхностей от загрязнений/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 06.12.57, № 587349/29 14; Опубл. в Б. И., 1968, № 7.

47. **А. с. 126348 (СССР).** Способ дробления твердых материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 10.12.57, № 587590 29 14; Опубл. в Б. И., 1983, № 18

48. **А. с. 126350 (СССР).** Способ дробления хрупких металлов, их карбидов и т. п. токопроводящих материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 02.01.58, № 589268 29 33; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

49. **А. с. 126351 (СССР).** Устройство для дробления хрупких металлов, их карбидов и т. п. токопроводящих материалов Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 02.01.58, № 589268/29 -33; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

50. **А. с. 126352 (СССР).** Устройство для дробления хрупких металлов, их карбидов и т. п. токопроводящих материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 02.01.58, № 589268/29 -33; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

51. **А. с. 196632 (СССР).** Способ очистки и обеззараживания жидкостей, преимущественно питьевых и сточных вод Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 02.01.58, № 589269 28 13; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

52. **А. с. 225799 (СССР).** Устройство для очистки и обеззараживания жидкостей, преимущественно питьевых и сточных вод/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 02.01.58, № 589269/28—13; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

53. **А. с. 237068 (СССР).** Способ механической обработки (например, дробление, очистка, бурение) вязких, волокнистых, твердых материалов при помощи электрогидравлических ударов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 08.01.58, № 589630 22—3; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

54. **А. с. 114646 (СССР).** Устройство для удаления окалины с поверхности горячекатаной полосы абразивным материалом/Л. А. Юткин, В. А. Коленко, А. Д. Кузьмин, и др.— Заявл. 28.01.58, № 591013; Опубл. в Б. И., 1958, № 8.

55. **А. с. 118061 (СССР).** Способ получения смазки для подвижных высоковакуумных соединений/Л. А. Юткин, С. А. Никольский, А. М. Лиманский и др.— Заявл. 10.02.58, № 591833 23; Опубл. в Б. И., 1959, № 4.

56. **А. с. 121885 (СССР).** Электрогидравлическое устройство Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 10.02.58, № 591876/24; Опубл. в Б. И., 1959, № 16.

57. **А. с. 145811 (СССР).** Способ уменьшения трения в трущихся парах/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 10.03.58, № 594494/25; Опубл. в Б. И., 1962, № 6.

58. **А. с. 124805 (СССР).** Гидравлический объемный насос/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл 07.03.59, № 621418/25; Опубл. в Б. И., 1959, № 23.

59. **А. с. 147162 (СССР).** Способ штамповки, вытяжки, гибки и производства других операций деформирования листовых пластических материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 23.03.59, № 622741/25; Опубл. в Б. И., 1962, № 10

60. **А. с. 260303 (СССР).** Способ получения удобренной почвы непосредственно в поле/Л. А. Юткин, А. Н. Мельникова. Заявл. 17.02.60, № 655378/30 15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

61. **А. с. 260304 (СССР).** Устройство для получения удобренной почвы непосредственно в поле/Л. А. Юткин, А. Н. Мельникова.— Заявл. 17.02.60, № 655378/30 15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

62 **А. с. 407048 (СССР).** Способ разрушения монолитных объектов преимущественно горных пород/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 26.09.61, № 745943/22—3; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

63 **А. с. 161820 (СССР).** Способ повышения эффективности электрогидравлических устройств/Л. А. Юткин, Г. Н. Яссиевич.— Заявл. 04.10.61, № 746837/24—7; Опубл. в Б. И., 1983. № 20.

64. **А. с. 446159 (СССР).** Устройство для электрогидравлической очистки изделий/Л. А Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 04.10.61, № 746998 22 2; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

65. **А. с. 446160 (СССР).** Устройство для очистки изделий/Л А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 04.10.61, № 746998, 22 2; Опубл. в Б. И, 1984, № 3.

66. **А. с. 227974 (СССР).** Способ передачи давлений/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 27.02.62, № 784458/25—27; Опубл. в Б. И., 1983, № 18

67. **А. с. 357345 (СССР).** Устройство для разрушения монолитных объектов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 23.08.62, № 792402 22—3; Опубл в Б. И, 1983, № 28

68. **А. с. 741611 (СССР).** Способ разрушения монолитных объектов, преимущественно горных пород электрическим тепловым взрывом токопроводящего элемента/Л. А. Юткин, Л. И Гольцова.— Заявл. 23.08.62, № 792402 22—03; Опубл. в Б. И, 1983, № 13.

69. **А. с. 359893 (СССР).** Матрица для импульсного формообразования/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 10.06.63, № 840092, 25—27; Опубл. в Б. И, 1973, № 17.

70. **А. с. 354683 (СССР).** Способ получения удобреиной почвы/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 07.06.63, № 946809/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 20.

71. **А. с. 199078 (СССР).** Способ обработки различных материалов высокими и сверхвысокими давлениями/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 07.10.63, № 860396/25—27; Опубл. в Б. И., 1967, № 15.

72 **А. с. 216602 (СССР).** Способ обработки материалов высокими и сверхвысокими давлениями/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 06.11.64, № 946810/25—27; Опубл. в Б. И., 1971, № 14.

73. **А. с. 192742 (СССР).** Головка подачи взрывающегося теплового элемента Л. А. Юткин, Л. И Гольцова.— Заявл. 20.11.64, № 946811/25 -27; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

74. **А. с. 210190 (СССР).** Способ улучшения удобрительных свойств торфа Л. А. Юткин, Л. И Гольцова. Заявл. 18.01 65, № 949723/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 2.

75. **А. с. 298168 (СССР).** Машина для очистки твердых, волокнистых и эластичных материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 23.06.65, № 1015334/28 13; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

76. **А. с. 199349 (СССР).** Устройство для изготовления форм/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 25.06.65, № 1016342 22—2; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

77. **А. с. 211918 (СССР).** Способ повышения содержания в среде, используемой для выращивания растений, азота в усвояемой растениями фор-

ме/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 02.07.65, № 1015897/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

78 **А. с. 453028 (СССР).** Способ выделения резины и корда из изношенных резинокордных изделий/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 03.07.65, № 1016136/23 5; Опубл. в Б. И., 1982, № 30.

79. **А. с. 469275 (СССР).** Способ приготовления кормов, преимущественно грубых/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. - Заявл. 09.07.65, № 1017099/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

80. **А. с. 335154 (СССР).** Устройство для снятия с вала и посадки на него гребного винта/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова Заявл. 31.07.65, № 1023809/27 11; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

81. **А. с. 221479 (СССР).** Способ разрушения клеточных структур растительных и животных тканей/Л. А Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 15.01.66, № 1050541/30 15; Опубл. в Б. И., 1983, № 2.

82. **А. с. 212972 (СССР).** Способ изготовления взрывающихся тепловых элементов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 15.01.66, № 1048884/25 27, Опубл в Б. И., 1983, № 18

83. **А. с. 477151 (СССР).** Способ электрогидравлического получения удобрений Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 23.06.66, № 1086197 30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1

84. **А. с. 478472 (СССР).** Устройство для распыления жидкости/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 16.01.67, № 1126268/30 -15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

85. **А. с. 389866 (СССР).** Способ обработки материалов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 30.01.67, № 1130724/25 27; Опубл. в Б. И., 1973, № 30.

86. **А. с. 595945 (СССР).** Способ обработки жидкостей/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. - Заявл. 23.02.67, № 1485999/29—26; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

87. **А. с. 310483 (СССР).** Индуктор для магнитно-импульсной обработки/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 20.03.67, № 1141020/25—27; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

88. **А. с. 953172 (СССР).** Способ крепления стенок скважины/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 29.03.67, № 1145728/22—03; Опубл. в Б. И., 1982, № 31.

89. **А. с. 459920 (СССР).** Способ импульсной штамповки/Л А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 11.09.67, № 1188780/25—27; Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

90. **А. с. 245467 (СССР).** Устройство для электрогидравлической обработки почвы Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 08.01.68, № 1210099/30 15; Опубл. в Б. И., 1983, № 2.

91 **А. с. 305692 (СССР).** Устройство для обработки и удобрения почвы/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 08.01.68, № 1210101/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 2.

92 **А. с. 275028 (СССР).** Способ подготовки торфа для микробиологической, бродильной и комбикормовой промышленности Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 16.07.68, № 1259290 28—13, Опубл. в Б. И., 1983, № 18.

93. **А. с. 402608 (СССР).** Способ создания подпочвенных трубопроводов/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 19.08.68, № 1269003/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 4.

94. **А. с. 705070 (СССР).** Устройство для создания кротовых дрен/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова Заявл. 19.08.68, № 1269004/30 15; Опубл. в Б. И., 1979, № 47.

95. **А. с. 264029 (СССР).** Способ накопления влаги в почве/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 08 12 68, № 1288200/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 1.

96. **А. с. 387564 (СССР).** Способ импульсной штамповки листовых материалов Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 22.12.69, № 1387886/25—27; Опубл. в Б. И, 1973, № 37.

97. **А. с. 952674 (СССР).** Устройство для подводной очистки корпуса судна Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. - Заявл. 05.01.70, № 1394466/27—11; Опубл. в Б. И., 1982, № 31.

98. **А. с. 409400 (СССР).** Способ фокусирования и изменения направления излучений/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 13.07.70, № 1460406/18—10; Опубл. в Б. И., 1973, № 48.

99. **А. с. 402617 (СССР).** Устройство для бестраншейного сооружения бетонных трубопроводов/Л. А. Юткин, М. В. Зубец, Ю. Е. Шамарин и др.— Заявл. 21.07.71, № 1688862/29—14; Опубл. в Б. И., 1973, № 42.

100. **А. с. 402618 (СССР).** Установка для сооружения кротовых дрен/Л. А. Юткин, М. В. Зубец, Ю. Е. Шамарин и др.— Заявл. 21.07.71, № 1688860/29—14; Опубл. в Б. И., 1973, № 42.

101. **А. с. 402342 (СССР).** Способ окультуривания глинистых почв/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова. Заявл. 28.02.72, № 1752996/30—15; Опубл. в Б. И., 1973, № 42.

102. **А. с. 467716 (СССР).** Способ защиты почвы от ветровой эрозии/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 16.10.72, № 1836359/30—15; Опубл. в Б. И., 1975, № 15.

103. **А. с. 454006 (СССР).** Способ орошения земель/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 23.02.73, № 1888013/30—15; Опубл. в Б. И., 1974, № 47.

104. **А. с. 673300 (СССР).** Устройство для обеззараживания, дегельминтизации и перемещения сточных жидкостей/Л. А. Юткин, Ю. В. Шамарин, А. И. Азаров и др.— Заявл. 09.11.76, № 2419833/23—26; Опубл. в Б. И., 1979, № 26.

105. **А. с. 894049 (СССР).** Дренажная труба/Л. А. Юткин, Е. И. Филиппова, В. А. Ларионов. Заявл. 26.12.78, № 2742330/30—15; Опубл. в Б. И., 1981, № 48.

106. **А. с. 822891 (СССР).** Выпускное днище для электрогидравлической дробилки/Л. А. Юткин, А. Л. Юткин, О. Л. Кокорина и др. Заявл. 21.05.79, № 2781135/29—33; Опубл. в Б. И., 1981, № 15.

107. **А. с. 1028260 (СССР).** Способ гранулирования семян и устройство для его осуществления/Л. А. Юткин, Л. И. Гольцова.— Заявл. 10.07.79, № 2841251/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 26.

108. **А. с. 829003 (СССР).** Линия для изготовления дражированных семян/Л. А. Юткин, Г. К. Лейкина, С. А. Прищепов и др.— Заявл. 11.11.79, № 2837672/30—15; Опубл. в Б. И., 1981, № 18.

109. **А. с. 950217 (СССР).** Установка для производства органического удобрения/Л. А. Юткин, О. Н. Мельникова, Г. К. Лейкина и др.— Заявл. 30.04.80, № 2918927/30—15; Опубл. в Б. И., 1982, № 30.

110. **А. с. 1027333 (СССР).** Устройство для создания кротовых дрен/Л. А. Юткин, А. Л. Юткин, О. Л. Кокорина. Заявл. 17.05.80, № 2921478/30—15; Опубл. в Б. И., 1983, № 25.

Оглавление

Предисловие 5

Введение 7

Глава 1. **Сущность и особенности электрогидравлического эффекта** 10

1.1. Сущность электрогидравлического эффекта . . . . . —
1.2. Принципиальная электрическая схема получения электрогидравлического эффекта 12
1.3. Явления, происходящие в жидкости при электрогидравлическом эффекте 14
1.4. Особенности электрогидравлического эффекта. Магнитное поле разряда 23
1.5. КПД электрогидравлического эффекта 30
1.6. Импульсная электрохимия 32

Глава 2. **Методы обеспечения практического использования электрогидравлического эффекта** 44

2.1. Сверхдлинный разряд . . . . . —
2.2. Тепловой взрыв 51
2.3. Электропневматика 60
2.4. Методы пространственно-временного управления энергией электрогидравлического эффекта 62
2.5. Реверсивный разряд 71
2.6. Импульсные диэлектрики 78

Глава 3. **Электрические схемы и комплектующее оборудование электрогидравлических установок** 86

3.1. Электрические схемы генераторов импульсов тока электрогидравлических устройств . . . . . —
3.2. Режимы работы ГИТ при электрогидравлической обработке различных материалов 91
3.3. Основное силовое оборудование ГИТ 93
3.4. Перспективы совершенствования оборудования электрогидравлических силовых установок 98

Глава 4. **Применение электрогидравлического эффекта в технологии машиностроения и металлообработке** 107

4.1. Электрогидравлическая очистка . . . . . —
4.2. Электрогидравлическое снятие внутренних напряжений (старение материалов) 119
4.3. Электрогидравлическая штамповка металлов 120
4.4. Электрогидравлические молоты 133
4.5. Электрогидравлические вибраторы 135
4.6. Электрогидравлические насосы 138
4.7. Электрогидравлическая раздача, развальцовка, обжатие 144

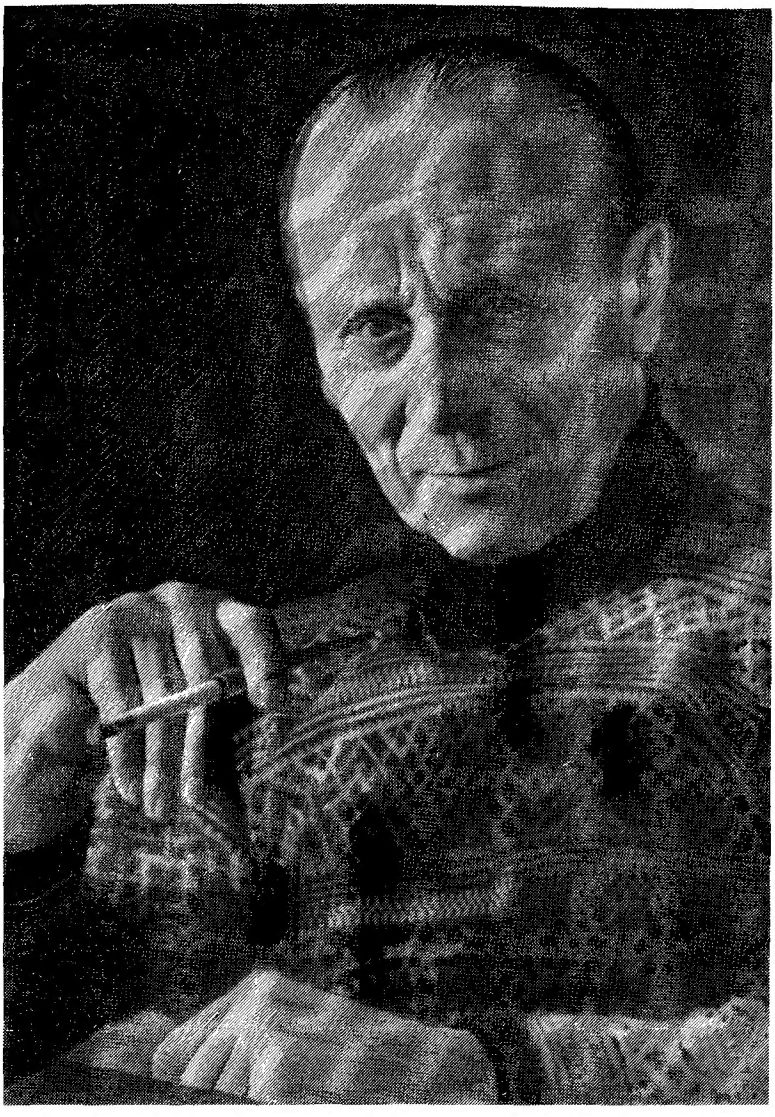
4.8. Электрогидравлическое упрочнение и наклеп 148
4.9. Электрогидравлическая сварка, спекание, покрытия . . . 150
4.10. Электрогидравлическое получение коллоидов и уплотнение порошков 152
4.11. Электрогидравлические транспортные устройства . . . 156

Глава 5. **Использование электрогидравлического эффекта в горном деле и промышленности строительных материалов** 159
5.1. Электрогидравлические взрыватели . . . . . —
5.2. Электрогидравлические устройства для бурения и резания горных пород 171
5.3. Электрогидравлические устройства для погружения свай 179
5.4. Электрогидравлические устройства для дробления различных материалов 180
5.5. Электрогидравлические устройства для коллоидного обогащения руд и бесшахтной добычи полезных ископаемых 196
5.6. Электрогидравлические устройства для активации и регенерации горных пород 199
5.7. Электрогидравлические геолокатор и гидролокатор . . . 201

Глава 6. **Применение электрогидравлического эффекта в химической промышленности** 204
6.1. Общие положения . . . . . —
6.2. Электрогидравлические эмульгаторы и деэмульгаторы 205
6.3. Электрогидравлическое выделение газов из жидкостей и получение пены 209
6.4. Электрогидравлические устройства для очистки топливных жидкостей 210
6.5. Электрогидравлическое отделение резины от корда . . . 211
6.6. Электрогидравлические устройства для очистки и обеззараживания жидкостей и органических субстратов . . . 212

Глава 7. **Использование электрогидравлического эффекта в агропромышленных отраслях** 218
7.1. Электрогидравлические почвообрабатывающие устройства . . . . . —
7.2. Электрогидравлические устройства для производства мелиоративных работ 226
7.3. Электрогидравлические устройства для прокладки высоковольтных кабелей 229
7.4. Электрогидравлические устройства для орошения . . . 232
7.5. Электрогидравлические устройства для очистки, обеззараживания и утилизации животноводческих стоков . . . 233
7.6. Электрогидравлические устройства для производства торфяной пульпы и обогащения торфа 235
7.7. Электрогидравлические устройства для дражирования семян 238
7.8. Электрогидравлические устройства для дробления органических материалов и приготовления растительных и животных кормов 239
7.9. Электрогидравлические устройства для комплексной обработки сельскохозяйственных продуктов 244

Список литературы 246



Лев Александрович Юткин

Производственное издание

Лев Александрович ЮТКИН

Электро-
гидравлический
эффект
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редактор *Л. М. Манучарян*
Художественный редактор *С. С. Венедиктов*
Технический редактор *Т. П. Малашкина*
Корректоры *Т. Н. Гринчук, И. Г. Иванова*
Переплет художника *Б. Н. Осенчакова*

ИБ № 4232

Сдано в набор 03.01.86. Подписано в печать 18.06.86. М-14718 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная Усл. печ. л. 16 Усл. кр.-отт. 16. Уч.-изд. л. 16,63. Тираж 2200 экз Заказ 1. Цена 1 р. 20 коп.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени
издательства «МАШИНОСТРОЕНИЕ»,
191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29. Отпечатано с диапозитивов в Ленинградской типографии № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.